



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## MODEL REGULÁTORU TLAKU PLYNU

MODEL OF A GAS PRESSURE REGULATOR

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tamara Bartková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Elcner, Ph.D.

BRNO 2017



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Tamara Bartková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Elcner, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Model regulátoru tlaku plynu

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Regulátor tlaku plynu je schopný v určitém rozsahu vstupního tlaku zajistit konstantní hodnotu výstupního tlaku pro požadovaný rozsah průtoku plynu. Mechanický regulátor se skládá z tělesa regulátoru, ventilu, primární a sekundární membrány, pružiny a nastavovacího mechanismu. Síly, které působí na ventil a sekundární membránu jsou v rovnováze a samotná regulace je zajištěna rovnováhou sil mezi pružinou a výstupním tlakem, působícím na primární membránu. Cílem této práce je na základě výkresové dokumentace vytvořit 3D geometrii regulátoru tlaku plynu, která poslouží jako základ numerického modelu, jenž bude sloužit ke stanovení bodů pracovní charakteristiky (výstupní tlak jako funkce průtoku).

#### Cíle bakalářské práce:

- Na základě výkresové dokumentace vytvořit 3D geometrii jednotlivých částí a sestavy regulátoru
- Vytvořit zjednodušený model pro simulaci proudění v regulátoru
- Ověřit funkčnost modelu

#### Seznam literatury:

VLÁČILOVÁ, Hana, Milena VILÍMKOVÁ a Lukáš HENCL. SolidWorks. Brno: Computer Press, 2006, 319 s. : il., 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 80-251-1314-0.

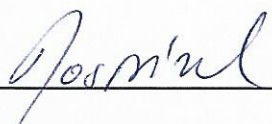
FREIBAUER, Martin, Hana VLÁČILOVÁ a Milena VILÍMKOVÁ. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2010, 326 s. : il. 1 CD-ROM. ISBN 978-80-251-2504-5.

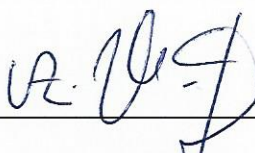
ROČEK, Jaroslav. Průmyslové armatury. Praha: Informatorium, 2002, 253 s. : il. ISBN 80-7333-000-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 14. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Táto bakalárska práca je zameraná na vytvorenie a overenie funkčnosti výpočtového 3D modelu tlakového regulátora plynu. Práca obsahuje prehľad rôznych typov regulačných zariadení a bezpečnostných prvkov, spolu s popisom ich funkcií a najdôležitejších častí. Takisto sa v nej nachádza opis praktického overenia funkčnosti telesa regulátoru a určenia prietokovej charakteristiky. Časť je venovaná tvorbe modelu na základe výkresovej dokumentácie. Ďalej je popísaný spôsob overenia funkčnosti a správnosti vytvoreného modelu, jeho porovnanie so skutočným regulátorom.

## **Abstract**

This bachelor's thesis is focused on creating and verifying functionality of computing 3D model of a gas pressure regulator. The work contains review of different types of regulators and safety features, including descriptions of their function and main features. It also contains a description verification of the functionality of a gas pressure regulator, including measure of flow – pressure characteristics. The following part contains overview of creating a 3D computing model based on mechanical drawings. Lastly described is comparison of created model with real product.

## **Kľúčové slová**

Regulácia plynu, regulácia tlaku, prietoková charakteristika regulátora, tvorba modelu regulátora, simulácia prúdenia, overenie funkčnosti modelu

## **Key words**

Gas regulation, pressure regulation, flow – pressure characteristics, computing 3D model of gas pressure regulator, flow simulation, verifying of functionality of 3D model of gas pressure regulator

**Bibliografická citácia**

BARTKOVÁ, T. *Model regulátoru tlaku plynu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 62 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Jakub Elcner, Ph.D.

## **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Model regulátoru tlaku plynu vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

V Brne 25.5.2017

.....

Tamara Bartková

## **PodĎakovanie**

Týmto ďakujem Ing. Jakubovi Elcnerovi, Ph.D. za cenné rady a pripomienky pri tvorbe bakalárskej práce.



<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1. Základný koncept regulácie</b>	<b>11</b>
<b>2. Konštrukcia a fyzikálny princíp jednostupňového regulátora</b>	<b>13</b>
2.1 Škrtiaci prvok	13
2.1.1 Nevratné deje – škrtenie plynu	14
2.2 Zaťažujúci prvok	15
2.3 Merací prvok	16
2.3.1 Deformačné tlakomery	17
2.4 Ďalšie časti telesa regulátora	19
<b>3. Regulátor s dvomi membránami - „kompenzovaný“ regulátor</b>	<b>20</b>
<b>4. Regulácia z vysokého na nízky tlak</b>	<b>22</b>
<b>5. Poistné prvky</b>	<b>23</b>
5.2 Uzatvárací ventil	24
5.2.1 Ochrana pred vysokým tlakom	24
5.2.2 Ochrana pred nedostatočným tlakom	24
<b>6. Skúšky tlakových regulátorov</b>	<b>26</b>
6.1 Skúšky tesnosti	26
6.1.1 Vnútoraná tesnosť	27
6.1.2 Vonkajšia tesnosť	27
6.2 Určenie regulačných schopností	28
<b>7. Experimentálne určenie prietokovej charakteristiky</b>	<b>30</b>
<b>8. Tvorba 3D modelu</b>	<b>34</b>
<b>9. Overenie funkčnosti modelu</b>	<b>37</b>
9.1 Prvé overenie funkčnosti	38
9.2 Simulácia prúdenia – určenie sily	38
<b>Záver</b>	<b>45</b>
<b>Zoznam použitých zdrojov</b>	<b>47</b>
<b>Zoznam použitých skratiek a symbolov</b>	<b>48</b>
<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>49</b>
<b>Zoznam príloh</b>	<b>50</b>

## Úvod

Regulácia tlaku plynu je nevyhnutne spojená so všetkými procesmi pracujúcimi s plynom pod vyšším tlakom. Presná regulácia na požadované hodnoty zabezpečuje správne a bezpečné využitie plynu. Dôsledkom nesprávnej regulácie môže byť napríklad nadmerná spotreba plynu a s tým spojené ekonomické a ekologické následky, alebo až situácie priamo ohrozujúce ľudský život – výbuch či únik jedovatých plynov.

Vďaka technologickému pokroku existuje mnoho rôznych nových poznatkov, ktoré sa dajú použiť na vytvorenie nových konceptov regulácie plynu, alebo na vylepšenie už zaužívaných. Nové nápady a technológie umožňujú postupne znižovať ekonomickú náročnosť výroby a vylepšovať funkčnosť a bezpečnosť regulátorov.

Každú potenciálnu zmenu na zariadení regulátora je potrebné overiť. Vyrábať však prototypy pre každú jednu úpravu zvlášť a testovať ich je finančne a časovo náročné. Preto sa pristupuje k numerickým metódam a počítačovým modelom. Tieto modely napodobňujú reálne regulačné telesá a podmienky, ktoré nastávajú počas ich prevádzky. Na správne vytvorenom počítačovom modeli je možné, vhodnou simuláciou, otestovať účinnosť každej technologickej úpravy. Až v prípade keď sa úprava na základe výpočtu ukáže ako výhodná, je vytvorený prototyp, ktorý je testovaný pri reálnych podmienkach.

## 1. Základný koncept regulácie

Plynové regulátory sú všeobecne rozšírené priemyselné armatúry každodenného využitia. Používajú sa napríklad v plynových tlakových nádobách, v domácnostiach, v plynových kotloch alebo rúrach, v motoroch, v zdravotníctve na reguláciu kyslíku či v pneumatických systémoch na reguláciu stlačeného vzduchu.

Pod pojmom regulácia plynu je možné chápať viacero dejov, ktoré spája základná myšlienka, že pri prechode plynu cez regulačný systém sa menia jeho prietokové vlastnosti.

Základnou predstavou tlakového regulátora je systém, ktorého úlohou je stabilizovať tlak na stanovenej hodnote. Musí teda správne reagovať na zmeny vstupných hodnôt a zabezpečiť požadovanú odozvu. Existujú rôzne typy mechanizmov, ktoré regulujú výstupný tlak (redukčné ventily), vstupný alebo aj diferenčný tlak.

Regulácia tlaku a prietoku plynu v systéme je nevyhnutá kvôli bezpečnosti, zníženiu strát a celkovému zefektívneniu využívania plynu. Cieľom teda je, aby vlastnosti plynu dodaného ku zákazníkovi umožňovali čo najlepšie fungovanie spotrebičov, čiže hodnoty prietoku a tlaku musia spadať do určených hraníc a nesmú kolísať. Regulátor zabezpečuje, aby bol výstupný tlak konštantný a nezávislý na výkyvoch vstupujúceho tlaku. Reakcia na zmenu vstupných parametrov musí byť automatická a okamžitá.

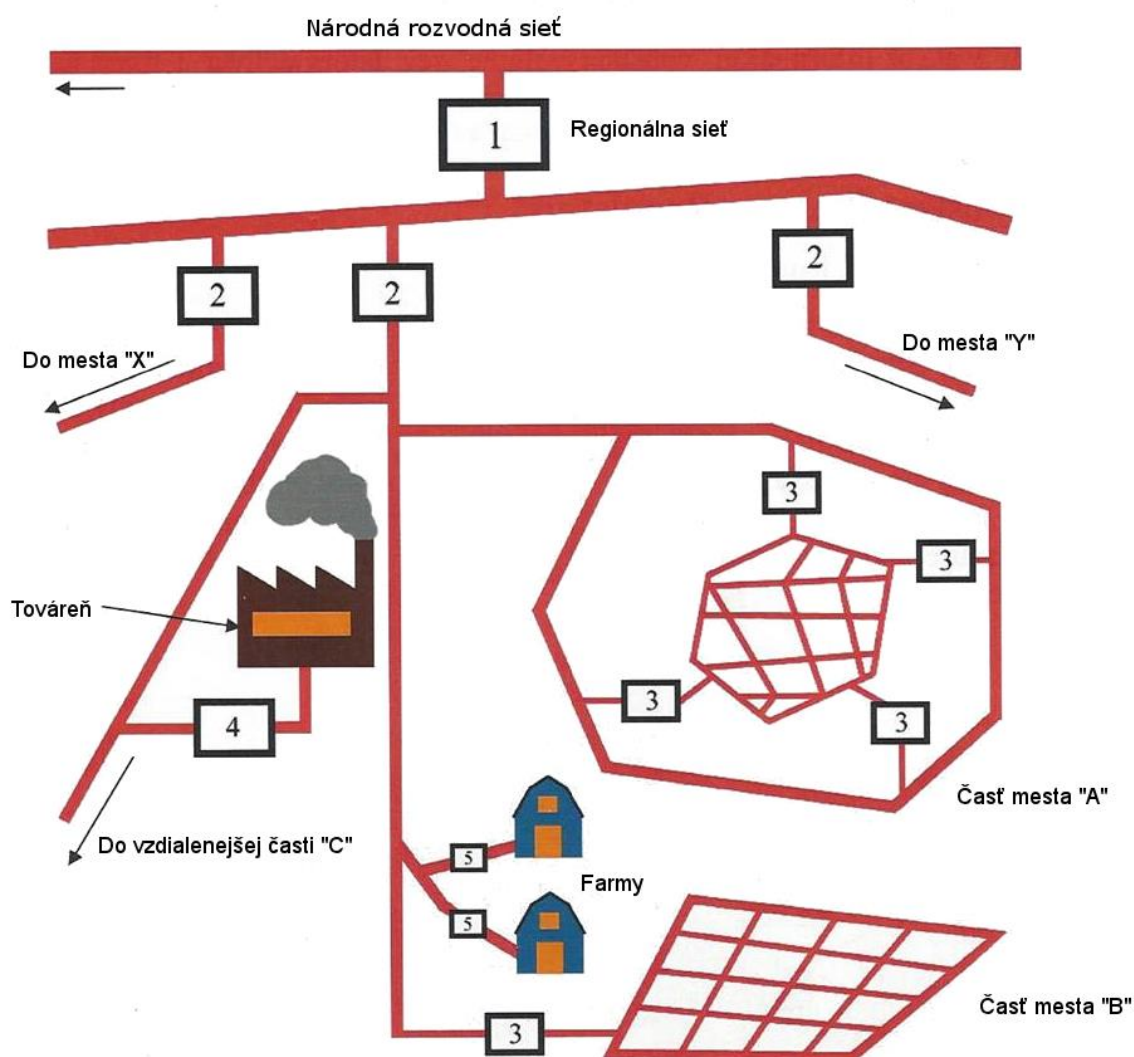
Veľké rozvodné systémy, plynovody, spájajú štáty a mestá do zložitej siete a zásobujú ich plynom – vid' *obrázok 1*. Medzi štátmi prechádza tranzitný plynovod, v ktorom prúdi plyn pod tlakom až 10 MPa. Vzdialené mestá sú spájané vysokotlakými plynovodmi s hodnotou tlaku približne do 4 MPa. Na vstupe do mesta je tento tlak znížený na strednú hodnotu, ktorá sa pohybuje do 400 kPa. V meste je ďalej postupne znižovaný až na hodnoty požadované koncovými spotrebičmi (do 5 kPa). [1]

Každé jedno zníženie tlaku je zabezpečené regulátorom. Rozdiel medzi vysokotlakým regulátorom a zariadením operujúcim so strednými až nízkymi tlakmi je len v zložitosti konštrukcie, fyzikálny princíp ostáva rovnaký.

Na základe požiadaviek zákazníka existuje viacero typov regulátorov výstupného tlaku. Podľa hodnoty tlakov s ktorými pracujú sú regulátory rozdelené na: vysokotlaké, strednotlaké a nízkotlaké. Regulátory môžu byť jedno alebo viacstupňové, s jednou alebo viacerými pracovnými membránami. Dvojstupňové regulátory sú zložitejšie, no dokážu zabezpečiť väčšie rozdiely medzi vstupným a výstupným tlakom. V prípade že je požadovaná zvýšená bezpečnosť, môže regulátor obsahovať viaceré bezpečnostné prvky. Či už ide o samostatný uzatvárací ventil, pretlakový odpúšťací ventil alebo jednoduchú prídavnú bezpečnostnú membránu. V určitých prípadoch sa bezpečnostné zariadenie pridáva ako samostatná jednotka do blízkosti regulátora.

Aj tieto bezpečnostné ventily sú určitým typom regulátorov. Ich úlohou nie je stabilizovať výstupnú hodnotu, ale zabezpečiť systém v prípade nežiaducich

okolností. Existujú bezpečnostné ventily, ktoré reagujú na nadmerne vysoký alebo naopak na príliš nízky tlak úplným uzavretím systému. Alebo poistné ventily, ktoré v prípade vysokého pretlaku vypustia časť média mimo systém. [2]



**Obrázok 1:** Schéma regulačnej siete [2]

**Tabuľka 1:** Regulačná sieť [1][2]

Číslo	Druh regulátora	Vstupný tlak	Výstupný tlak
1	Regionálny odber - Vysokotlaké regulátory	4 – 10 MPa	0,4 – 4 MPa
2	Vstup do mesta – Vysokotlaké alebo strednotlaké regulátory	0,4 – 4 MPa	0,005 – 0,4 MPa
3	Strednotlaké alebo nízkotlaké regulátory	0,005 – 0,4 MPa	≤5 kPa
4	Vzdialenejšie továrne - Strednotlaké regulátory	0,005 – 0,4 MPa	≤0,14 MPa
5	Vysokotlaké alebo strednotlaké regulátory	0,005 – 0,4 MPa	≤5 kPa

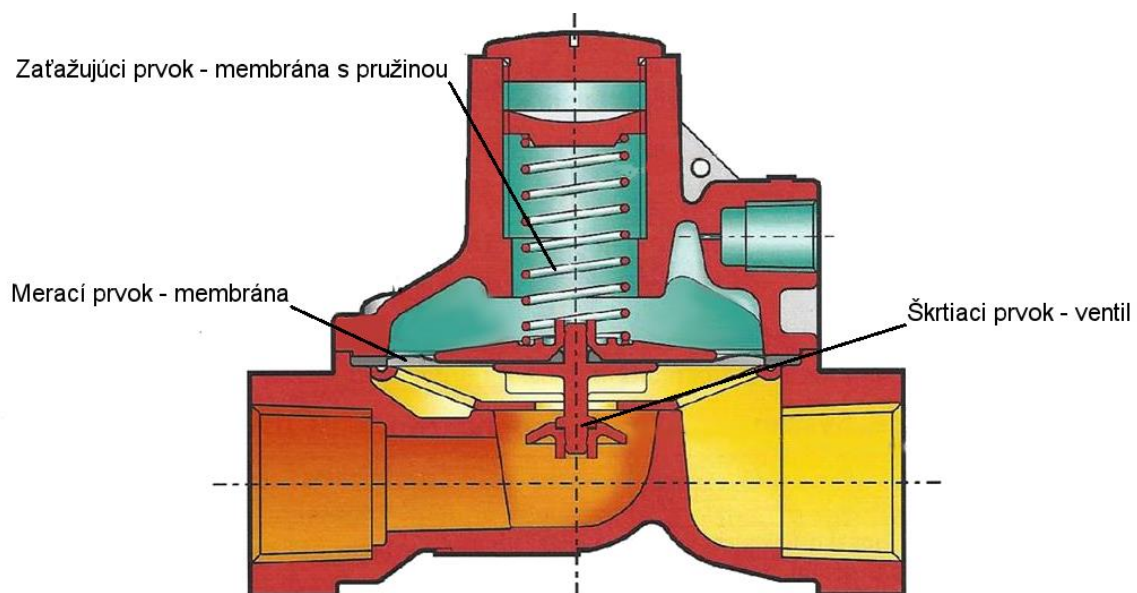
## 2. Konštrukcia a fyzikálny princíp jednostupňového regulátora

V jednostupňovom regulátore prebieha zníženie tlaku v jednom kroku. Plyn prechádza jediným škrtiacim prvkom, ktorý spôsobuje tlakové straty. V dvojstupňovom regulátore sa nachádzajú ventily dva.

Základný princíp konštrukcie telesa je pri všetkých typoch jednostupňových regulátorov rovnaký.

Na reguláciu prietoku plynu sú nevyhnutné tri základné časti. Je to **škrtiaci prvok** – ventil, ktorého pootvorenie udáva plochu, ktorou môže prúdiť plyn. Toto pootvorenie je premenlivé, závisí od podmienok v systéme. Na škrtiaci ventil teda musí pôsobiť zaťažujúca sila, ktorá udáva jeho polohu. Túto silu bude vytvárať tzv. **zaťažujúci prvok**. Pootvorenie ventilu však nie je náhodné. Je preto zrejmé, že v celom systéme musí existovať ďalší prvok, ktorého úlohou je kontrolovať podmienky v sústave a reagovať na ich zmenu. Túto kontrolu zabezpečuje tzv. **merací prvok**. [3]

Obrázok 2 zobrazuje hlavné funkčné časti na schéme jednostupňového regulátora.



Obrázok 2: Jednostupňový regulátor, typ 150DJ [2]

### 2.1 Škrtiaci prvok

Úlohu škrtiaceho prvku väčšinou plnia rôzne druhy ventilov – guľový, šúpatko, sedlový, ihlový... Nezáleží na zvolenom druhu ventilu (ak dostatočne plní svoju funkciu), najčastejšie sa však používa sedlový ventil s kužeľom. Jeho kužeľová plocha dosadá na plochu sedla, ktoré sa nachádza v spodnej časti regulátora. Presné dosadenie plôch zabezpečuje vnútornú tesnosť konštrukcie. Kužeľ ventilu sa väčšinu času prevádzky regulátora nachádza v polohe medzi úplným uzavretím (nulová poloha) a úplným otvorením (maximum). [3][4]

### 2.1.1 Nevratné deje – škrtenie plynu

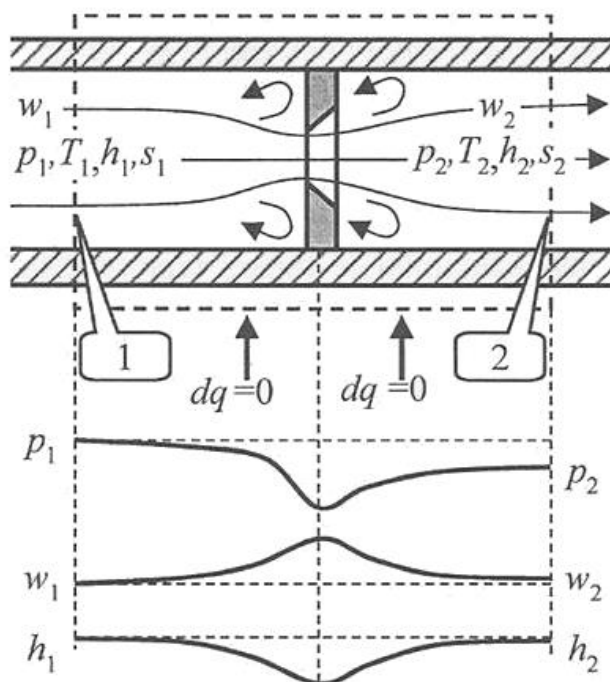
Kužel ventilu, spolu s otvorom ventilu, tvorí prekážku v prúde plynu, vytvára zúženie, ktoré spôsobuje škrtenie plynu. Pri tomto deji dochádza ku trvalej tlakovej strate prúdiacej tekutiny.

Tak ako všetky reálne deje v prírode aj škrtenie je termodynamický nevratný dej. Pri nevratnom deji dochádza v sústave ku zvýšeniu entropie. Sústava, ktorá prejde nevratným dejom sa po vykonaní deju opačného nevráti naspäť do pôvodného stavu, tak ako je tomu pri dokonalých vratných dejoch. Medzi typické nevratné deje patrí okrem škrtenia plynov napríklad aj vznik tepla trením, difúzia plynu či vyrovnávanie konečných rozdielov tlakov.

Uzavretím ventilu sa zmenší plocha, ktorou preteká plyn cez ventil. Pri regulovaní podmienok v plynovodnom systéme musí množstvo plynu, ktoré prejde za daný čas kontrolnou plochou v sústave zodpovedať požiadavkám spotrebiču. Na to aby tento prietok ostal konštantný musí za rovnaký čas cez zúženie v priereze pretiecť väčšie množstvo tekutiny ako v mieste s väčším prierezom. Rýchlosť prúdenia tekutiny je v tomto mieste výrazne vyššia. Dochádza k premene časti vnútornej energie (entalpie) na energiu kinetickú. Podľa zákona zachovania mechanickej energie zvýšenie jedného druhu energie v sústave vždy sprevádza pokles iného druhu. Energia nevzniká ani nezaniká, mení sa z jednej formy na druhú.

V tesnej blízkosti pred a za clonou sa tvoria samostatné víry. Častice plynu vo víre prúdia inou rýchlosťou ako v hlavnom prúde, tento bočný vír má aj odlišnú teplotu ako hlavný prúd. Teplotný rozdiel medzi plynom v hlavnom prúde a bočnom víre umožňuje nevratný prenos tepla, zvýšenie entropie a zníženie celkovej energie plynu. Tak, ako sa pri prechode škrtiacim prvkom vnútorná energia mení na kinetickú, za zúžením sa zase časť kinetickej energie mení v dôsledku trenia na teplo. Zníženie vnútornej energie je reprezentované poklesom hodnoty tlaku.

Z obrázku 3 je vidieť, že približne v mieste najväčšieho zúženia je rýchlosť prúdenia ( $w$ ) najvyššia, avšak hodnoty entalpie ( $h$ ) a tlaku ( $p$ ) tu dosahujú svoje minimum. V skutočnosti sa bod v ktorom majú jednotlivé funkcie svoje extrémy, nachádza v malej vzdialenosti od zúženia v smere prúdenia. Po prechode ventilom rýchlosť klesne na svoju pôvodnú



Obrázok 3: Priebeh škrtiacim ventilom [5]

veľkosť. Hodnota entalpie stúpne, ako aj hodnota tlaku, ktorá však kvôli prestupu energie do okolia ostane značne nižšia ako bola pred škrtením. Celkový rozdiel tlakov  $\Delta p = p_1 - p_2$  ( $p_1$  – tlak pred škrtením,  $p_2$  – tlak po prechode ventilom) je daný stratou energie v dôsledku vzniku bočných vírov. Niektoré typy ventilov (napríklad guľový) minimalizujú energetické straty, čím spôsobujú minimálny rozdiel medzi hodnotou vstupného a výstupného tlaku. Keďže hlavným cieľom tlakového regulátora je spôsobiť pokles tlaku (a udržať výstupný tlak na predpísanej hodnote v presnosti podľa zákazníka), je potrebné použiť ventil, ktorý spôsobí dostatočné straty energie.

Hodnoty  $p_1$  a  $p_2$  musia byť merané v dostatočnej vzdialenosti od ventilu, v mieste, kde je možné pokladať prúdenie za ustálené – stacionárne.

Maximálna rýchlosť, ktorou môže plyn prúdiť ventilom je rovná rýchlosti zvuku pri daných podmienkach. Nazýva sa kritická rýchlosť. Odpovedá jej kritický prietok a kritický rozdiel tlakov. Pri ďalšom zväčšovaní rozdielu tlakov za kritickú hodnotu sa už prietok nezvýši. Jediná možnosť ako ďalej zvýšiť prietok je zvýšiť vstupný tlak. Rýchlosť ostane na kritickej hodnote no dôjde ku zvýšeniu hustoty plynu. Hodnota kritického rozdielu tlakov závisí od geometrie prúdenia a typu ventilu. [5][6]

## 2.2 Zaťažujúci prvok

Priestor, v ktorom prebieha zníženie tlaku plynu je od vrchnej časti regulátora oddelený membránou. Vo vrchnej časti regulátora je malým otvorom vo vrchnom kryte udržiavaný okolitý atmosférický tlak. Membrána preto musí zaistiť tesnosť sústavy. Pri zvýšených požiadavkách na bezpečnosť sa nad ňu ešte umiestňuje druhá, bezpečnostná membrána.

V priestore pod membránou sa nachádza plyn o výstupnom tlaku  $p_{out}$ . Plyn zospodu tlačí na membránu, ktorá je pevne spojená s telesom ventilu. Zdvihnutím membrány sa nadvihne aj ventil. Pri maximálnom zdvihnutí sa ventil uzavrie. K úplnému uzavretiu ventilu ale má dôjsť len v špeciálnych prípadoch, napríklad pri chybe v systéme ktorá spôsobí, že hodnota výstupného tlaku neprimerane stúpne. Na ventil musí teda pôsobiť v opačnom smere primeraná sila, ktorá bude vyrovnávať silu výstupného tlaku na membránu, tak aby ventil ostal v otvorenej rovnovážnej polohe.

Táto zaťažujúca sila je vytvorená tlačnou pružinou, ktorá sa v predstlačenom stave nachádza vo vrchnej časti telesa. Pri výbere pružiny je rozhodujúcou vlastnosťou jej tuhosť.

Tuhosť tlačnej pružiny  $k$  udáva akou silou je potrebné pôsobiť na pružinu, aby bola stlačená o jednotkovú dĺžku.

$$k = \frac{F_p}{d} \quad (1)$$

$k$  – tuhosť pružiny [N/m]

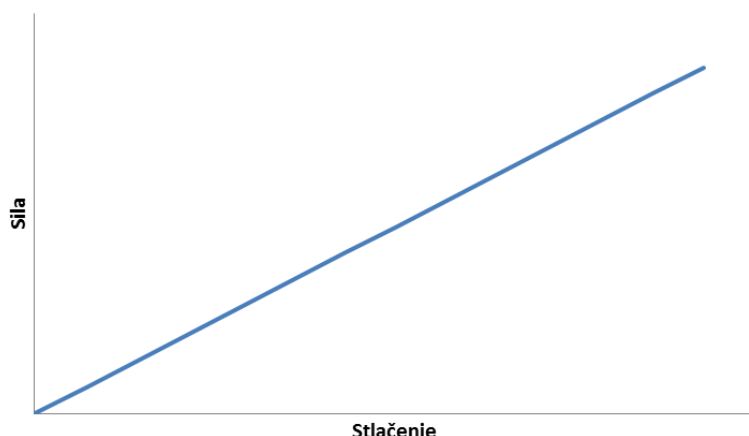
$F_p$  – sila pôsobiaca na pružinu [N]

$d$  – stlačenie [m]

Tuhosť pružiny závisí od materiálu, z ktorého je vyrobená, priemere drôtu, strednom priemere vinutia a počte závitov v závislosti na dĺžke. [7]

Z rovnice (1) je zrejmá lineárna závislosť medzi silou a stlačením pružiny, zobrazená graficky na.

Pri predstlačenej pružine je potrebné na stlačenie  $d$  vyvinúť úmerne väčšiu silu, ako v prípade stláčania o tú istú vzdialenosť z nezaťaženej stavu. [3][7]



Obrázok 4: Závislosť sily na stlačení pri lineárnej pružine  $F_p = k \cdot d$

### 2.3 Merací prvok

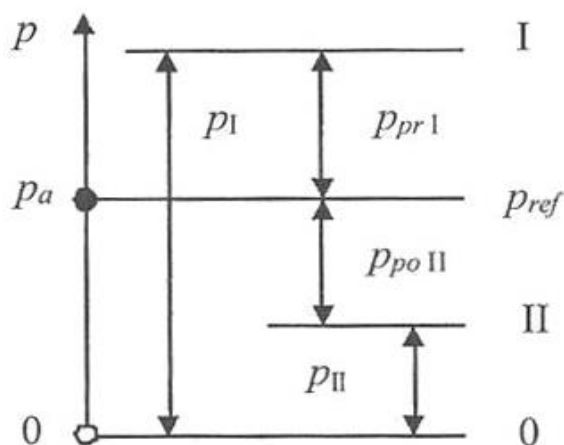
Na správnu reguláciu výstupného tlaku je potrebná spätná kontrola. V telese regulátora sa teda musí nachádzať prvok ktorý reaguje na hodnotu výstupného tlaku a podľa nej upraví konfiguráciu regulátora tak aby naďalej spĺňal požiadavky. [3] Zariadenia, ktoré dokážu určiť hodnotu tlaku sa nazývajú tlakomery.

Existuje viacero druhov meračov tlaku ktoré sa delia do skupín podľa presnosti merania, rozsahu merania alebo fyzikálneho princípu.

Podľa rozsahu merania [5][8]:

- Barometre – merajú absolútny tlak okolitého ovzdušia – barometrický tlak (niekedy sa označuje ako atmosférický)
- Manometre – slúžia na meranie pretlaku, čo je rozdiel medzi absolútnym tlakom, ktorý je vyšší ako barometrický a barometrickým tlakom (viď obrázok 5)
- Vakuometre – udávajú hodnotu podtlaku, čo je rozdiel absolútneho tlaku nižšieho ako barometrický a barometrického tlaku





Obrázok 5: Absolútne a relatívne tlaky [5]

$p_I$  – absolútna hodnota tlaku hladiny I

$p_{II}$  – absolútna hodnota tlaku hladiny II

$p_{pr I}$  – pretlak hladiny I voči referenčnému tlaku  $p_{ref}$ , ktorý býva najčastejšie atmosférický  $p_a$

$p_{po II}$  – podtlak hladiny II voči referenčnému tlaku

[5]

Podľa fyzikálneho princípu [8]:

- Kvapalinové – meraný tlak je vyrovnávaný hydrostatickým tlakom stĺpca tlakomernej kvapaliny. Hodnota meraného tlaku  $p$  je potom daná podľa vzťahu (2).

$$p = \rho g h \quad (2)$$

( $h$  – výška stĺpca kvapaliny,  $\rho$  – hustota kvapaliny,  $g$  – gravitačné zrýchlenie)

Ako tlakomerná kvapalina sa využíva alkohol, voda, ortuť, tetrachlór či iné.

- Piestové tlakomery – meraný tlak pôsobí na piest, ktorý je vyvažovaný závažím alebo pružinou.
- Deformačné – meraný tlak spôsobuje úmernú elastickú deformáciu tlakomerného členu
- Piezoelektrický snímač – meraný tlak spôsobuje deformáciu kryštálu, následkom čoho sa vytvára v snímači úmerné elektrické napätie, ktoré je ďalej spracovávané

### 2.3.1 Deformačné tlakomery

Pôsobenie tlaku na tlakomerný člen deformačného tlakomeru spôsobuje jeho elastickú deformáciu, tým do určitej malej miery mení jeho geometriu.

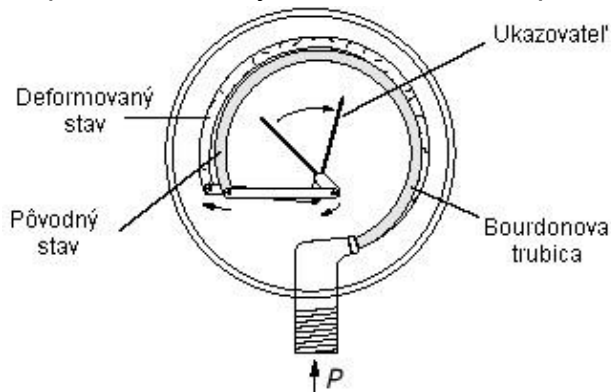
Deformačné merače patria medzi najčastejšie využívané vďaka ich jednoduchosti, malým rozmerom a schopnosti pracovať s veľkými silami. Nevýhodou je však malá zmena tlakomerného členu. Výchylka môže byť mechanicky prevedená na ručičku priameho ukazovateľa tlaku, alebo môže byť spracovaná na elektrický či pneumatický signál, s ktorým sa dá ďalej pracovať.

Veľkosť deformácie tlakomerného členu určuje nielen výsledná sila pôsobiaceho tlaku, ale aj vratná silou ktorá je daná vlastnou pružnosťou tohto členu, prípadne aj silou pridaného zaťažujúceho prvku – pružiny.

Ako deformačný člen môže slúžiť Bourdonova rúrka, vlnovec či membrána.

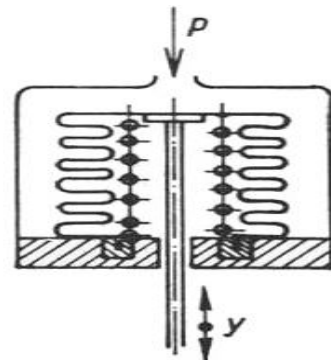
Základným mechanizmom **Bourdonovej trubice** (obrázok 6) je stočená tenkostenná trubica eliptického či oválneho prierezu. Trubička je na jednom konci otvorená, pevne spojená s telesom tlakomeru. Na tomto konci je prívod meraného

ho tlaku. Druhý uzavretý, voľne pohyblivý koniec je spojený cez prevod s ukazovateľom na stupnici. Pri pôsobení pretlaku v trubici sa jej steny rozpínajú. Eliptický prierez sa rozťahuje a mení na kruhový. Následkom čoho sa stočenie trubice narovnáva a voľný koniec sa posúva úmerne k pôsobiacemu tlaku. Posuv je cez prevod viditeľný na ukazovateli stupnice.



Obrázok 6: Schéma Bourdonovej trubice [9]

Merače tlaku, ktorých deformačný člen je membrána sa nazývajú **membránové**. Na meranie vysokých tlakov (do 250 kPa) sa používa membrána z nerezovej ocele. Membrána má tvar kruhovej platne, ktorá je zvlnená sústrednými vlnami a po obvode je pevne zovretá prírubami. Na jednej jej strane je privádzaný meraný tlak. Pôsobením tlaku sa membrána prehne. Výchylka je pomerne malá a musí sa mechanicky prevádzať na uhlovú výchylku ukazovateľa na stupnici. Kovová membrána má vlastnú tuhosť a nemusí byť dopĺňovaná prídavnou pružinou. Na nižšie tlaky sa využívajú membrány s textilným jadrom, na ktoré je nanesený gumový plášť. Tento typ je veľmi lacný, ľahký a vysoko citlivý na zmeny tlaku. Pri tlakomeroch s gumenou membránou sa však ako deformačný člen využíva pružina.



Obrázok 7: Schéma vlnovca [8]

**Vlnovcové** tlakomery (obrázok 7) využívajú ako tlakomerný prvok tenkostenný mech – vlnovec, ktorý je uložený v puzdre. Meraný tlak je privádzaný do priestoru medzi vonkajšou stranou vlnovca a puzdra. Mech je pôsobením tlaku stláčaný, deformovaný a vzniknutá výchylka sa tiahlom prenáša na ukazovateľ. Tuhosť vlnovca sa môže zvýšiť pridaním pružiny. V prípade že je mech vyrobený z umelej hmoty, preberá úlohu deformačného člena pružina.

Pri konštrukcii nízkotlakého regulátora nie je potrebné do telesa umiestňovať ukazovateľ aktuálneho tlaku. Z uvedených tlakomeroch je teda konštrukčne najvhodnejšie použiť čo najjednoduchší a najlacnejší merací prvok. Kvapalinové alebo piestové merače vyžadujú pomerne komplikovanú konštrukciu a sú zložitejšie na údržbu.

Ako merací prvok pri výrobe regulátora teda najlepšie bude slúžiť gumená membrána doplnená pružinou ktorá sa v sústave už nachádza a vykonáva funkciu zaťažujúceho člena. [3][8][9]

## 2.4 Ďalšie časti telesa regulátora

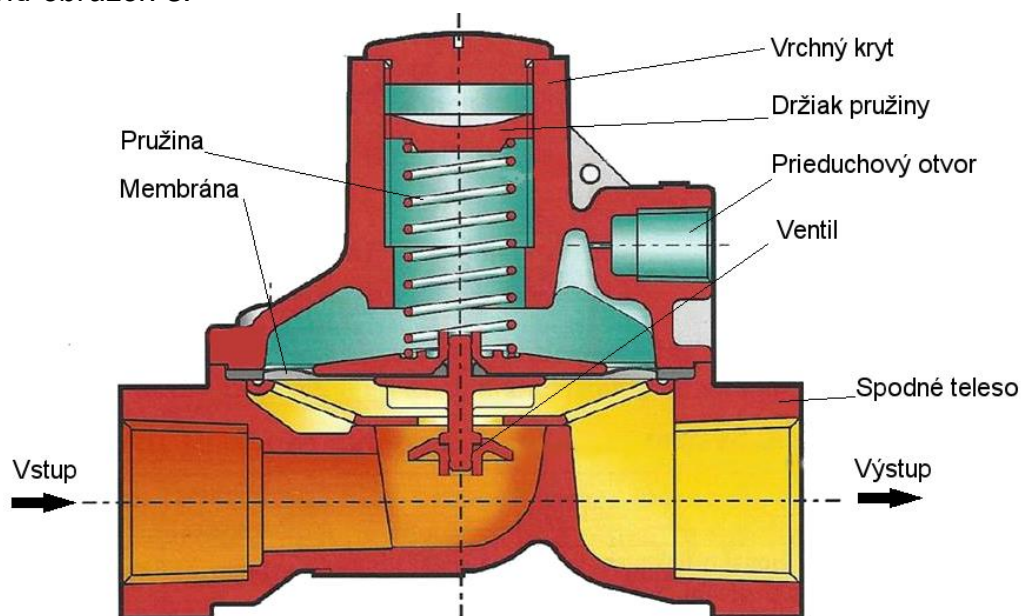
Regulátor sa ďalej skladá zo spodného telesa, v ktorom sa nachádzajú otvory na prívod a odvod plynu a sedlo škrtiaceho ventilu. Spodné teleso je odliatok z hliníkovej zliatiny, ktorého veľkosť a hrúbka steny závisí od tlakov s ktorými pracuje a predpísaného mechanického namáhania (ohyb, krut) , ktoré musí za-riadenie vydržať.

Vrchný kryt regulátora dosadá prírubou tesne na membránu a zabezpečuje jej polohu. Otvor v jeho stene privádza do priestoru nad membránou vzduch s atmosférickým tlakom. Vo vnútri je umiestnená pružina, ktorej predstlačenie môže byť nastaviteľné.

Pružina je uchytená držiakom, ktorého poloha určuje jej predstlačenie. Polohu držiaku je možné (v prípade dvojmembránového regulátora – viď ďalej kapitola 3) meniť nastavovacou skrutkou.

Hlava nastavovacej skrutky je dostupná po odňatí plastového krytu na samom vrchu regulátora.

Pre lepšie pochopenie konštrukcie jednostupňového typu s jednou membránou viď *obrázok 8*.



**Obrázok 8:** Jdnostupňový regulátor, typ 150DJ [2]

### 3. Regulátor s dvomi membránami - „kompenzovaný“ regulátor

Ďalším variantom jednostupňového regulátora je dvojmembránový typ. Oproti regulátoru s jedinou membránou je jeho konštrukcia zložitejšia, zato regulácia je efektívnejšia. Medzi ventilom a primárnou membránou sa navyše nachádza sekundárna membrána. Membrány sú od seba oddelené membránovou vložkou, ktorá zabezpečuje ich stálu vzdialenosť. V priestore medzi nimi je plyn s výstupným tlakom  $p_{out}$ , ktorý je sem privádzaný impulznou rúrkou

Impulzná rúrka spája vzniknutý priestor medzi membránami s výstupom regulátora. Nachádza sa v dostatočnej vzdialenosti od ventilu, kde sa už dá prúdenie pokladať za stacionárne. V prípadoch, kedy sa regulátor nenachádza v blízkosti spotrebiču, je potrebné použiť na privod tlaku  $p_{out}$  externú impulznú rúrku, ktorá sa nachádza mimo telesa regulátora, vo väčšej vzdialenosti smerom po prúde plynu. Externá rúrka bude do telesa privádzať plyn z blízkosti spotrebiču. Takto bude regulátor reagovať na správne hodnoty tlaku. Použitím externej impulznej rúrky sa dajú kompenzovať tlakové straty medzi regulátorom a spotrebičom spôsobené napríklad konštrukciou plynovodu.

Sekundárna membrána sa môže nazývať aj kompenzačnou. Jej efektívna plocha je približne rovnaká ako plocha ventilu, vďaka čomu kompenzuje silové účinky na ventil.

**Silová bilancia (obrázok 9):**

$$\text{Sily pôsobiace smerom dole: } F_{y1} = F_p + p_{in} \cdot S_v + p_{out} \cdot S_2 \quad (3)$$

$$\text{Sily pôsobiace smerom hore: } F_{y2} = p_{in} \cdot S_2 + p_{out} \cdot S_v + p_{out} \cdot S_1 \quad (4)$$

$F_p$  – sila od tlačnej pružiny [N]

$p_{in}$  – vstupný tlak [Pa]

$p_{out}$  – výstupný tlak [Pa]

$S_v$  – efektívna plocha ventilu [m<sup>2</sup>]

$S_1$  – efektívna plocha primárnej membrány [m<sup>2</sup>]

$S_2$  – efektívna plocha sekundárnej membrány [m<sup>2</sup>]

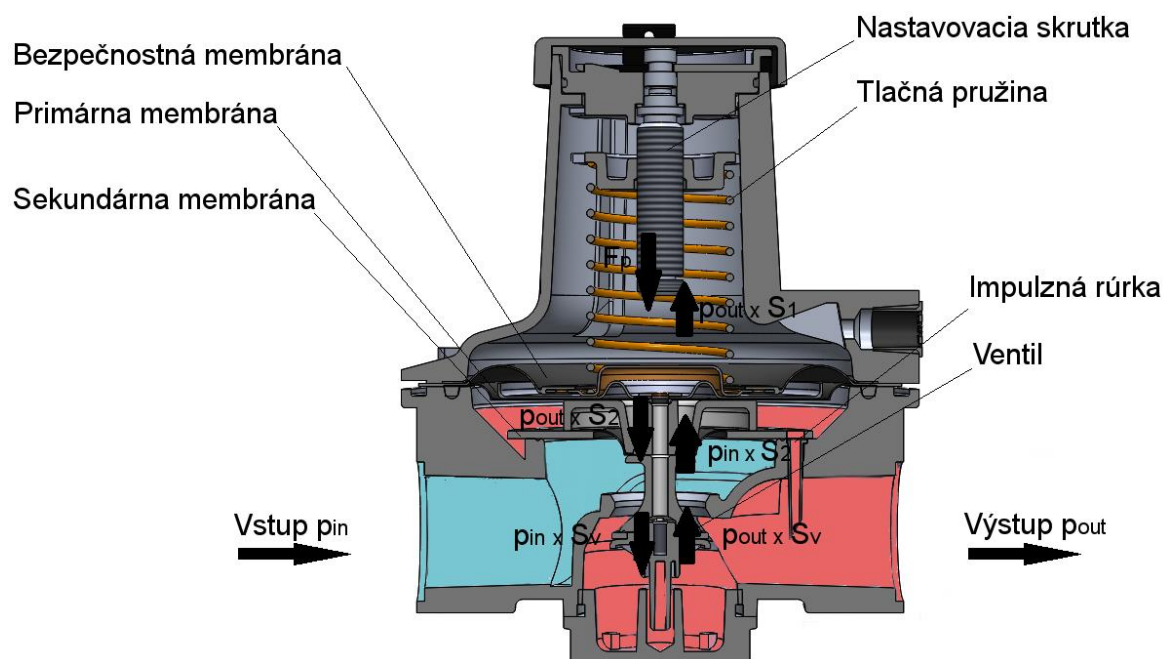
V pokoji sa celková suma síl pôsobiacich v regulátore rovná nule. Čiže sa rovnice (3) a (4) rovnajú.

$$F_p + p_{in} \cdot S_v + p_{out} \cdot S_2 = p_{in} \cdot S_2 + p_{out} \cdot S_v + p_{out} \cdot S_1 \quad (5)$$

Keďže efektívna plocha sekundárnej membrány je približne rovnaká  $S_2 \cong S_v$  z rovnice (5) sa stane:

$$F_p = p_{out} \cdot S_1 \quad (6)$$

Je vidieť, že výstupný regulovaný tlak je závislý iba na geometrii primárnej membrány a tlačnej sily pružiny. Funkčná plocha primárnej membrány je daná konštrukciou regulátora a je počas jeho prevádzky nemenná. Sila pružiny závisí od jej stlačenia, čiže od posunu telesa ventilu. [1][3]



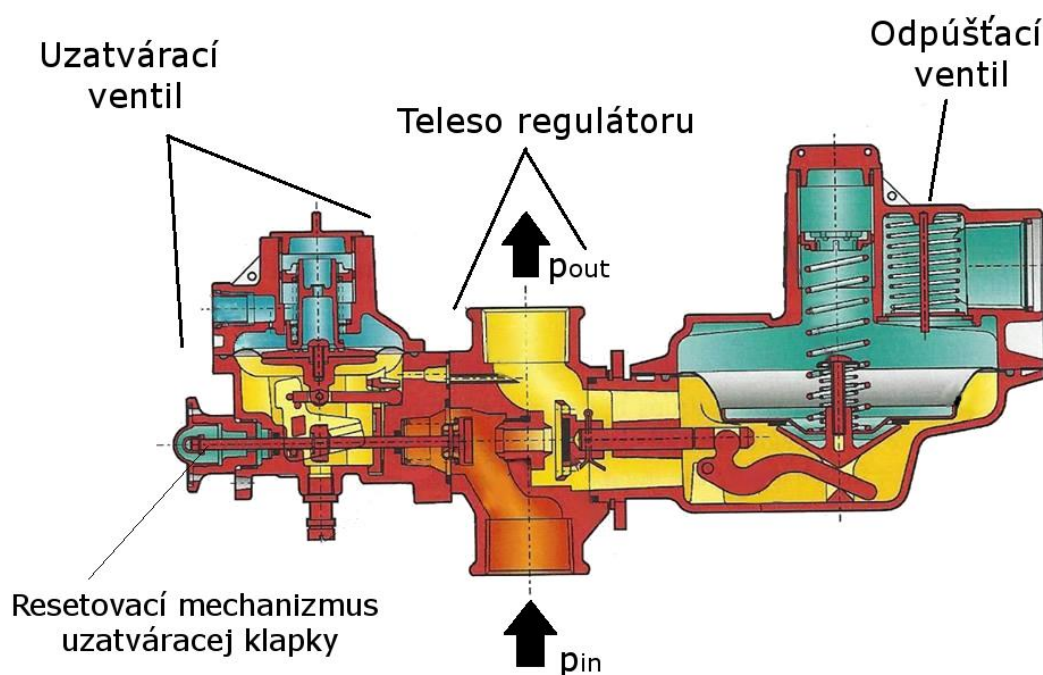
**Obrázok 9:** Znáznorenie silových účinkov v rovnováhe v dvojstupňovom regulátore GDJ 25

#### 4. Regulácia z vysokého na nízky tlak

Vo väčšine prípadov k zákazníkovi, alebo konkrétne do domácností, prichádza plyn z mestského rozvodu, ktorý je pod nízkym tlakom. Regulácia je v týchto prípadoch zabezpečená vyššie spomenutými regulátormi. Môžu sa však vyskytnúť aj situácie, keď je prívod plynu zabezpečovaný potrubím so stredným či vysokým tlakom. Typicky je to v prípadoch, keď je v prívodnom potrubí nutné zvýšiť tlak ako odpoveď na vyšší dopyt, alebo v prípadoch, keď sa zákazník nachádza mimo nízkotlakového rozvodu ale v blízkosti vysokotlakového. Príkladom druhého prípadu sú farmy vzdialenejšie od mesta. V týchto situáciách je potrebné na reguláciu použiť iný, vhodnejší typ výrobku.

Vysokotlaké regulátory sú konštrukčne zložitejšie ako nízkotlaké no základný princíp ostáva rovnaký.

Okrem regulačnej časti ktorá spôsobuje tlakové straty, sú vo väčšine prípadov k telesu pridávané ďalšie prvky (obrázok 10). Bývajú to pretlakové či podtlakové bezpečnostné ventily, ktoré môžu uzatvoriť celý systém, alebo pretlakové odpúšťacie poistné ventily. [1]



**Obrázok 10:** Regulátor z vysokého na nízky tlak, typ J125 s prídavnými ochrannými prvkami [2]

## 5. Poistné prvky

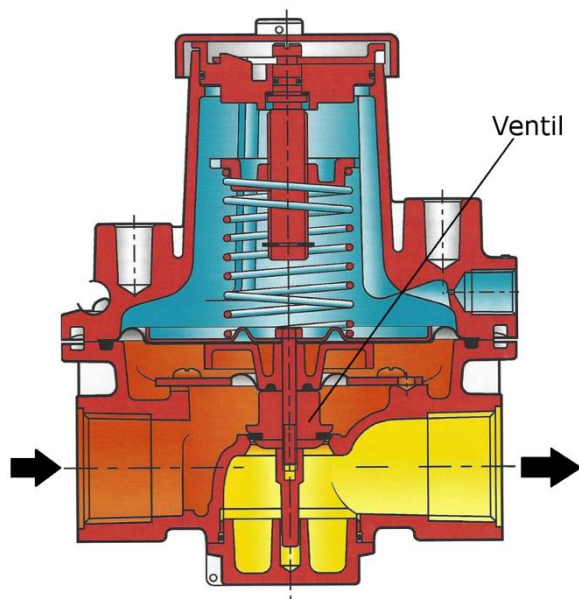
### 5.1 Odpúšťacie ventily

Poistné ventily sú automaticky pracujúce bezpečnostné armatúry, ktoré zabezpečujú tlakové zariadenia pred poškodením. Pri ohrození zariadenia nedovoleným zvýšením tlaku, poistný ventil zareaguje odpustením časti média, čím sa tlak v systéme zníži. Po znížení tlaku sa poistný ventil musí uzavrieť, dlhšie odpúšťanie pracovnej látky by spôsobilo nechcené straty.

Poistný ventil môže byť priamo integrovaný do telesa regulátora alebo sa môže nachádzať ako samostatná jednotka v tesnej blízkosti za telesom regulátora.

Teleso ventilu môže byť otvorené, kedy odpúšťaná pracovná látka uniká priamo do okolia, uzavreté s výfukovým systémom, ktorý látku odvádza na určité miesto alebo plynutesné kedy nesmie dôjsť k akémukoľvek úniku do atmosféry. Ventil s uzavretým telesom môže mať výpusť smerovanú napríklad do okolia, von z budovy alebo do zbernej nádoby.

Najjednoduchším a najpoužívanejším je priamočinný poistný ventil (obrázok 11). Celková funkcia priamočinného poistného ventilu závisí na rovnováhe vnútorných síl, čiže síly, ktorou pôsobí plyn na kužeľ ventilu a síly vonkajších, ktoré pôsobia v opačnom smere. Vonkajšie sily môžu byť vytvárané tiažou závažia, ktorá je počas celého zdvihu konštantná alebo tlačnou pružinou, ktorej sila závisí od jej stlačenia.



**Obrázok 11:** Príklad samočinného odpúšťacieho ventilu, konkrétne schéma bezpečnostného zariadenia J48K - Elster Jeavons Pressure Relief Valve [2]

Konstruktúra priamočinného ventilu s pružinou je veľmi podobná jednoduchému regulátoru s dvoma membránami. Z časti je to spôsobené snahou o zefektívnenie výroby, kedy sa jednotlivé časti regulačného zariadenia s malými úpravami používajú v rôznych typoch výrobkov.

Rozdielom je opačné otočenie kužeľa ventilu. Pružina, ktorej sila v predchádzajúcom prípade spôsobovala otvorenie ventilu, teraz zabezpečuje jeho dostatočné dosadnutie a uzatvorenie. Keď vstupný tlak stúpne nad určitú hodnotu, sila ktorou pôsobí zospodu na primárnu membránu pretlačí pôsobenie pružiny.

Pružina sa stlačí, ventil sa otvorí a plyn prejde cez teleso ďalej.

Priamočinný ventil môže byť doplnený prídavným zaťažením, ktoré spôsobuje vyššiu pritlačnú silu na ventil a teda lepšiu tesnosť v uzavretom stave. Pružina je doplnená o tlačnú tyč so servovalcom. Prídavný stlačený vzduch pôsobí zvrchu na kužeľ piestu, pritláča ho pevnejšie o sedlo a teda vylepšuje tesnosť. V okamihu, keď tlak pracovného plynu prekročí predpísanú hranicu je prídavný

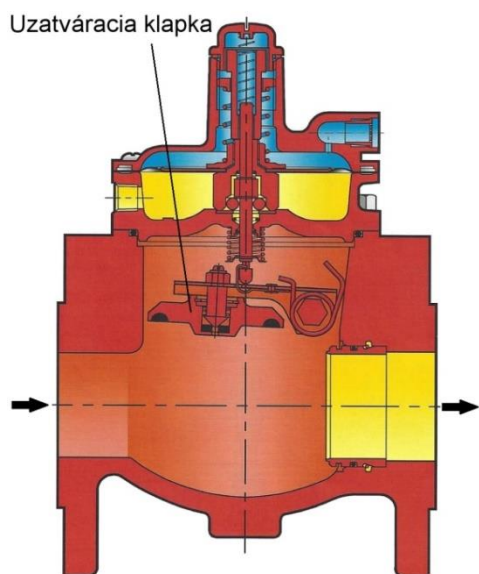


tlak vypustený a doplnková sila mizne. Ventil sa ďalej správa ako jednoduchý priamočinný.

## 5.2 Uzatvárací ventil

Ako napovedá názov, uzatvárací ventil má za úlohu pri svojej činnosti úplne zastaviť prúdenie plynu ďalej do systému. Podľa typu môže reagovať na nadmerne vysokú hodnotu tlaku plynu alebo práve naopak na nízku.

### 5.2.1 Ochrana pred vysokým tlakom



Obrázok 12: Príklad samostatného telesa s uzatváracím ventilom [2]

Uzatvárací ventil, ktorý chráni pred nadmerným tlakom sa v systéme pripája pred aktívny regulátor, ale je impulznou rúrkou spojený s miestom za regulátorom. Reaguje teda na tlak ďalej v systéme. Tento tlak je privádzaný pod membránu a tlačí ju smerom hore proti pružine. Na membránu je pripevnená os, na ktorej konci je zachytený zatvárací mechanizmus. V prípade nadmerného tlaku kedy je sila pôsobiaca zospodu na membránu väčšia ako sila od pružiny, sa membrána spolu s osou pohne hore. Zachytenie zatváracieho mechanizmu sa uvoľní a silná torzná pružina pritlačí uzatváraciu klapku o výstupný otvor. Klapka tesne dosadá na otvor a uzatvára potrubie (obrázok 12). Znovuotvorenie potrubia je manuálne.

### 5.2.2 Ochrana pred nedostatočným tlakom

Nutnosť ochrany systému pred extrémne nízkym tlakom nemusí byť na prvý pohľad zrejmá. Nebýva totiž vždy potrebná, no môžu sa vyskytnúť špecifické prípady. Prívod plynu môže byť prerušený poruchou v prívodnej sieti, napríklad prasknutím potrubia. Alebo napríklad v prípade LPG môže byť zlyhanie spôsobené vyčerpaním nádrže, či extrémne nízkymi teplotami, ktoré spôsobujú že sa kvapalina nevyparuje.

Existuje možnosť, že cieľové spotrebiče (kúrenie, sporák..) ostali zapnuté v momente, kedy došlo k zlyhaniu. Po odstránení chyby potom môže dôjsť k úniku plynu do atmosféry.

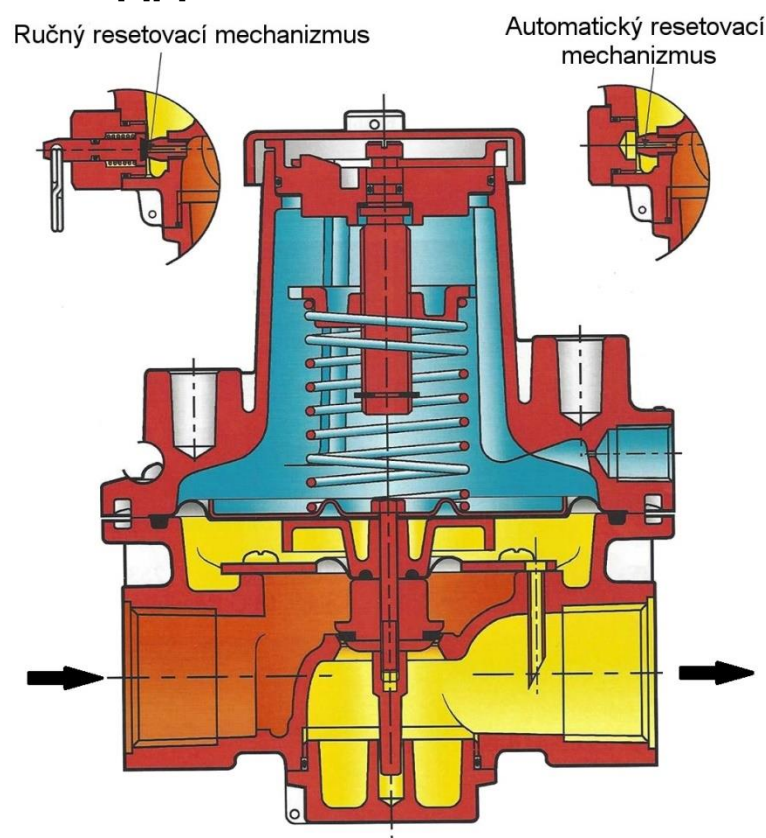
Zariadenie, ktoré uzatvorí systém v takomto prípade je konštrukčne takmer rovnaké ako vyššie spomenutý dvojmembránový regulátor. Rozdiel je v polohe uzatváracieho ventilu (obrázok 13). V prípade extrémne nízkej hodnoty vstupného tlaku  $p_{in}$  klesne na nízku hodnotu aj výstupný tlak  $p_{out}$ . Sila od plynu na výstupe, ktorá pôsobí zospodu na membránu je zanedbateľná oproti sile pružiny. Ventil je tlačенý pružinou dole a pevne dosadá na sedlo, čím uzatvára priechod.



Po opravení chyby je vstupný tlak  $p_{in}$  vyšší ako výstupný  $p_{out}$ . Ventil je však uzatvorený a je to práve výstupný tlak, ktorý ho pri správnej hodnote dokáže udržať otvorený.

Existujú dva možné spôsoby ako celý systém vrátiť do pôvodného stavu. Manuálny a automatický. V oboch prípadoch sa mechanizmus nachádza v stene, ktorá oddeľuje priestor so vstupným tlakom od priestoru s tlakom výstupným. Mechanizmus je prístupný z vonku, nachádza sa hneď vedľa vstupného otvoru.

V manuálnom resetovacom mechanizme sa nachádza vretienko, ktorého povytiahnutím sa uvoľní priechod a vyšší tlak  $p_{in}$  môže obísť uzatvorený ventil. Pri automatickom mechanizme je namiesto vretienka maličký otvor. Ak je zásobovateľ vypnutý, plyn sa pomaly v systéme nahromadí, tlak stúpne a ventil sa otvorí. Ak ostal spotrebič zapnutý malé množstvo plynu unikne a tlak medzi membránami ostane nízky. Preto je potrebné, aby bol otvor priechodu čo najmenší. [1][4]



**Obrázok 13:** Samostatné bezpečnostné teleso s uzatváracím ventilom na ochranu pri nízkom tlaku [2]

## 6. Skúšky tlakových regulátorov

Pri každom telese regulátora musí byť zaistená jeho spoľahlivá prevádzka pri určených podmienkach.

To znamená: v celom rozmedzí vstupných tlakov ktoré sú uvedené v návode na montáž a prevádzku, v rozmedzí teplôt okolia od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  (prípadne väčšom, ak je tak určené výrobcom) a vo všetkých prevádzkových polohách stanovených v návode na montáž a prevádzku.

Medzi najdôležitejšie skúšky patria skúšky vonkajšej a vnútornej tesnosti, mechanické skúšky krútenia a ohybu, tlakové a prietokové skúšky.

### 6.1 Skúšky tesnosti

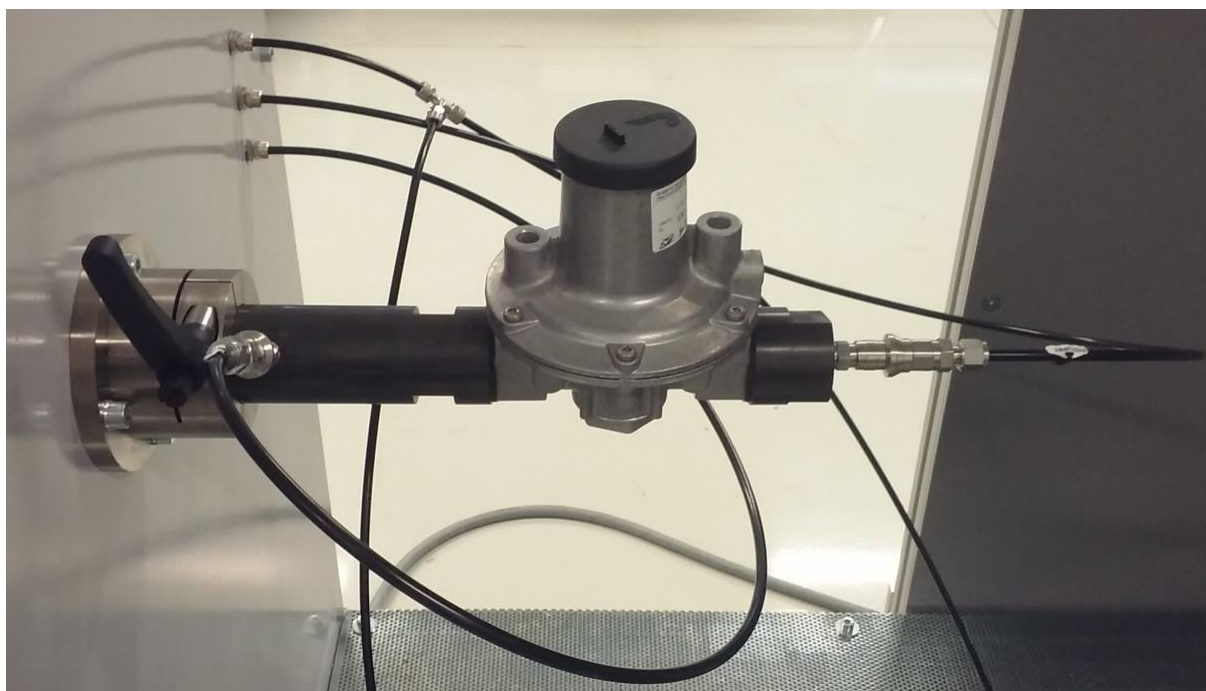
Ovládacie zariadenia musia byť vhodne utesnené. Únik nebezpečnej látky do okolia alebo prepúšťanie média ďalej do systému, keď má byť prietok nulový je z bezpečnostných dôvodov nežiaduce. Dokonalé utesnenie nie je v reálnych podmienkach možné a preto je vždy dovolený istý malý únik plynu podľa noriem.

Pri regulátoroch sú posudzované dva druhy tesnosti. Tesnosť vnútorná a vonkajšia. Skúšky tesností sa vykonávajú pri troch rôznych teplotách: minimálnej a maximálnej dovolenej prevádzkovej teplote a pri izbovej teplote ( $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Pribeh a podmienky skúšky sú určené normou STN EN 13611.

Na *obrázku 14* je stanica, na ktorej sa dajú vykonávať skúšky vonkajšej a vnútornej tesnosti a takisto tlakové skúšky. [10]



**Obrázok 14:** Stanica pre skúšku tesnosti a pevnosti



**Obrázok 15:** Detail upevnenia telesa regulátora počas skúšok tesnosti

### 6.1.1 Vnútoraná tesnosť

Regulátor musí byť, v prípade potreby, schopný zastaviť ďalší prietok plynu. Čiže do určitej miery nahrádzať funkciu uzatváracieho ventilu. Hlavná funkcia regulátora však nie je zabezpečiť úplné uzatvorenie systému, takže tu je dovolená istá netesnosť určená normou. Podľa *tabuľky 2*, je vidieť že napríklad pre typ GDJ 25, ktorého svetlosť vstupného otvoru je 25 mm, je dovolený únik maximálne 40 cm<sup>3</sup>/h skúšobného plynu - vzduchu.

Pri meraní vnútornej tesnosti sa vykonávajú skúšky pri začiatočnom tlaku vzduchu 0,6 kPa a potom sa meranie opakuje pri 1,5-násobku maximálneho vstupného tlaku alebo pri 15 kPa, podľa toho, ktorá hodnota je vyššia.

Škrtiaci prvok regulátora je pri skúške udržiavaný v zatvorenej polohe dostatočne nízkym výstupným tlakom. Na vstup sa privedie vstupný tlak vyššie uvedenej hodnoty. Únik plynu je vidieť z nameraného prietoku. Pri úplnej tesnosti by mal ventil zabrániť akémukoľvek ďalšiemu toku. Prietok, čiže únik, by mal byť nulový. [10]

### 6.1.2 Vonkajšia tesnosť

Teleso regulátora nesmie do okolia prepúšťať žiaden plyn. Ako už ale bolo povedané, dokonalá tesnosť v reálnych prípadoch neexistuje. Preto je aj tu dovolená určitá netesnosť. Do okolia môže uniknúť isté, malé množstvo plynu, tiež dané normou STN EN 13611. Dovolené hodnoty úniku pre vzduch sú uvedené v *tabuľke 2*.

Existuje viacero spôsobov ako zistiť, či je regulátor tesný. Najjednoduchšie je celé teleso natlakovať, uzatvoriť, ponoriť do vody a sledovať, či a kde sa tvoria bublinky. Tento spôsob je jednoduchý a účinný ale nezistí sa ním hodnota úniku.

Na určenie množstva uniknutého plynu sa najčastejšie využívajú dve metódy.

- 1) Regulátor je natlakovaný na hodnotu určenú normou tak, že sa na vstup aj výstup privedie ten istý tlak. Následne je teleso uzavreté a je sledovaný pokles tlaku. Z tohto poklesu je potom určený únik.
- 2) Na vstup aj výstup je opäť privedený rovnaký tlak. Výstup je uzavretý, ale na vstup je pripojený zásobník. Akýkoľvek únik plynu z telesa je kompenzovaný dodaním plynu zo zásobníku. Tlak v telese zostáva rovnaký a množstvo plynu ktoré unikne je rovnaké ako množstvo dodané zo zásobníku. Hodnota úniku je zistená zmeraním prietoku plynu medzi zásobníkom a regulátorom.

Vonkajšia tesnosť musí byť zabezpečená aj po opakovanom rozložení a zložení regulátora. Pri skúškach je teleso päť krát demontované a opätovne zmontované podľa návodu a skúška je zakaždým zopakovaná. Pri určovaní vonkajšej tesnosti sa skúšky vykonávajú pri 1,5-násobku maximálneho vstupného tlaku alebo pri 15 kPa, podľa toho ktorá hodnota je vyššia. [10]

**Tabuľka 2:** Maximálne hodnoty úniku[10]

Menovitá svetlosť DN	Maximálne hodnoty úniku cm <sup>3</sup> /h vzduchu	
	Vnúťorná tesnosť	Vonkajšia tesnosť
DN<10	20	20
10≤DN≤25	40	40
25<DN≤80	60	60
80<DN≤150	100	60
150<DN<250	150	60

## 6.2 Určenie regulačných schopností

Redukčný regulátor by mal byť v ideálnom prípade schopný znížiť vstupnú hodnotu tlaku plynu na požadovanú výstupnú hodnotu pri akomkoľvek prietoku. V skutočnosti je táto schopnosť značne limitovaná. Každý typ regulátora má, pri danom vstupnom tlaku, prietokové pásmo, v ktorom pracuje najlepšie. Pri vyšších hodnotách prietoku výstupný tlak klesá pod požadovanú hodnotu. Na správny výber produktu pre zákazníka je teda potrebné určiť okrem hodnôt  $p_{in}$  a  $p_{out}$  aj požadované prietoky, pri ktorých bude pracovať. Na základe týchto údajov sa následne vyberie najvhodnejší typ regulátora.

Závislosť medzi veľkosťou prietoku a výškou výstupného tlaku, pri konštantnom vstupnom tlaku, zobrazuje prietoková charakteristika. Tá je určená normovanou skúškou na meracej trati (viď kapitola 7). [10]

Priebeh prietokovej charakteristiky (obrázok 16) má viacero význačných oblastí.

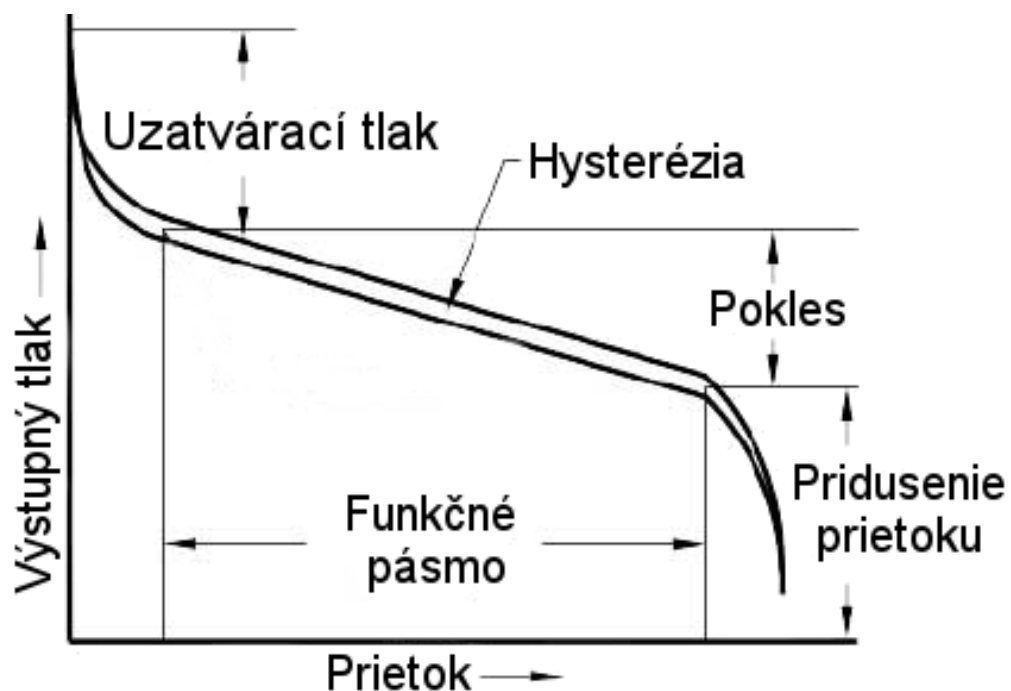
- a) Uzatvárací tlak – (anglicky: lockup pressure) – pásmo, v ktorom je najnižší prietok ovládacím zariadením a najvyšší výstupný tlak. Môže dôjsť k uzavretiu ventilu regulátora.
- b) Pridusenie prietoku – (choked flow) - od určitého bodu pri každom ďalšom malom zvýšení prietoku nastane dramatické zníženie výstupného tlaku. Tejto oblasti sa treba vyvarovať, regulátor už pri takto vysokých prietokoch nie je schopný správnej funkcie.

- c) Funkčné pásmo – medzi pásmom uzatváracieho tlaku a pridusenia prietoku sa nachádza oblasť, v ktorej daný regulátor funguje najlepšie. Pri prietokoch v tomto pásme sa veľkosť výstupného tlaku nachádza v dovolenom intervale okolo požadovanej výstupnej hodnoty.

Pokles tlaku vo funkčnom pásme – anglicky droop – je spôsobený premenlivou silou, ktorou pôsobí pružina. Pri nízkom prietoku je ventil privretý, pružina je viac stlačená a pôsobí vyššou silou. Z rovnice (6) vyplýva, že ak sa sila od pružiny zvýši, výstupný tlak  $p_{out}$  sa zníži. Pri najväčšom možnom prietoku je ventil úplne otvorený. Stlačenie pružiny je vtedy najmenšie možné. Sila, ktorou tlačí na membránu je teda najmenšia a výstupný tlak klesá.

Ďalší jav pozorovateľný pri tvorbe prietokovej charakteristiky je hysterézia. Pojem hysterézia pomenováva závislosť stavu systému na jeho histórii.

Ak je skúška vykonaná s postupným zvyšovaním prietoku, namerané hodnoty výstupného tlaku budú nižšie ako tie, ktoré by boli určené pri teste so znižovaním prietoku. Tento jav je spôsobený vlastnosťami gumenej membrány, vnútornými trecími silami. Hysterézia nie je v praxi veľmi významná, ale má vplyv na hrúbku pri návrhu membrány. [10][11]



Obrázok 16: Tvar prietokovej charakteristiky [11]



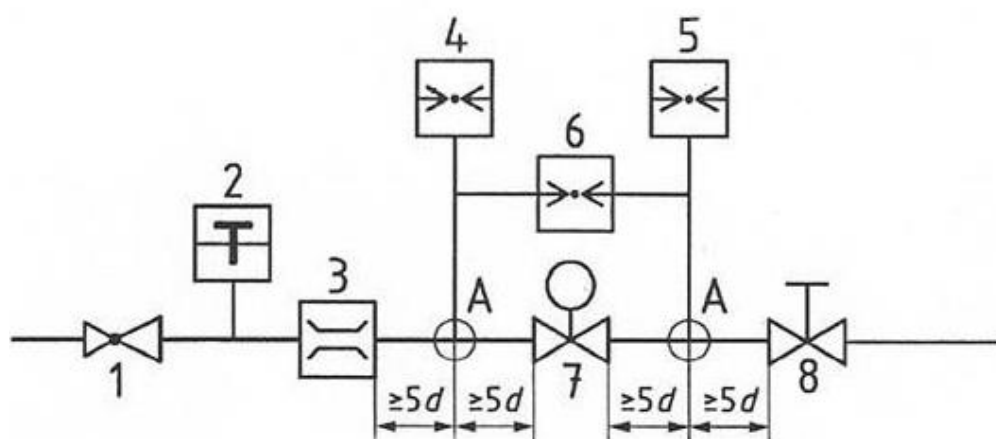
## 7. Experimentálne určenie prietokovej charakteristiky

Cieľom tejto skúšky bolo vytvoriť prietokové charakteristiky pre 4 rôzne vstupné tlaky a overiť schopnosť regulátora regulovať výstupný tlak na určenú výstupnú hodnotu v zadanej triede presnosti.

Priebeh skúšky je pomerne jednoduchý. Na určenie charakteristiky bol vybraný jeden zástupca regulátorov typu GDJ 25. Daný model regulátora dokáže pracovať so vstupnými tlakmi do 400 mbar (40 kPa), ktoré ďalej, podľa nastavenia, znižuje na výstupný tlak. Hodnota výstupného tlaku závisí od použitej pružiny a môže sa pohybovať v rozmedzí od 5 mbar do 160 mbar (0,5 – 16 kPa). [12]

Teleso vybrané na meranie charakteristiky bolo vo výrobe nastavené podľa návodu na montáž a prevádzku tak, aby hodnota výstupného tlaku bola 70 mbar (7 kPa). [12]

Teleso bolo pomocou normovaných redukcií so snímačmi zapojené do meracej trate (obrázky 18, 20).

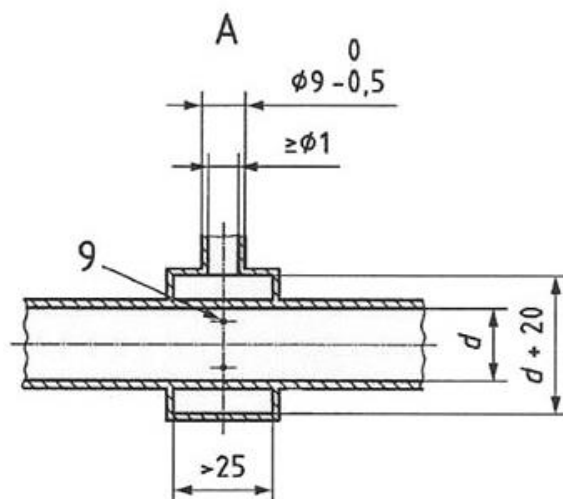


**Obrázok 17:** Schéma meracej trate [10]

1 – nastaviteľný regulátor vstupného tlaku, 2 – teplomer, 3 - prietokomer, 4 – tlakomer vstupného tlaku  $p_{in}$ , 5 – tlakomer výstupného tlaku  $p_{out}$ , 6 – meradlo tlakového rozdielu, 7 – skúšané ovládacie zariadenie, 8 - ručný nastavovací prvok ovládacieho zariadenia - nastavovanie prietoku



**Obrázok 18:** Meracia trať na určovanie prietokovej charakteristiky



**Obrázok 19:** A - detail prípojky skúšaného telesa [10]

9 – 4 otvory s priemerom  $\phi 1,5\text{mm}$

d – vnútorný priemer rúrky – závisí od typu (veľkosti) skúšaného prvku

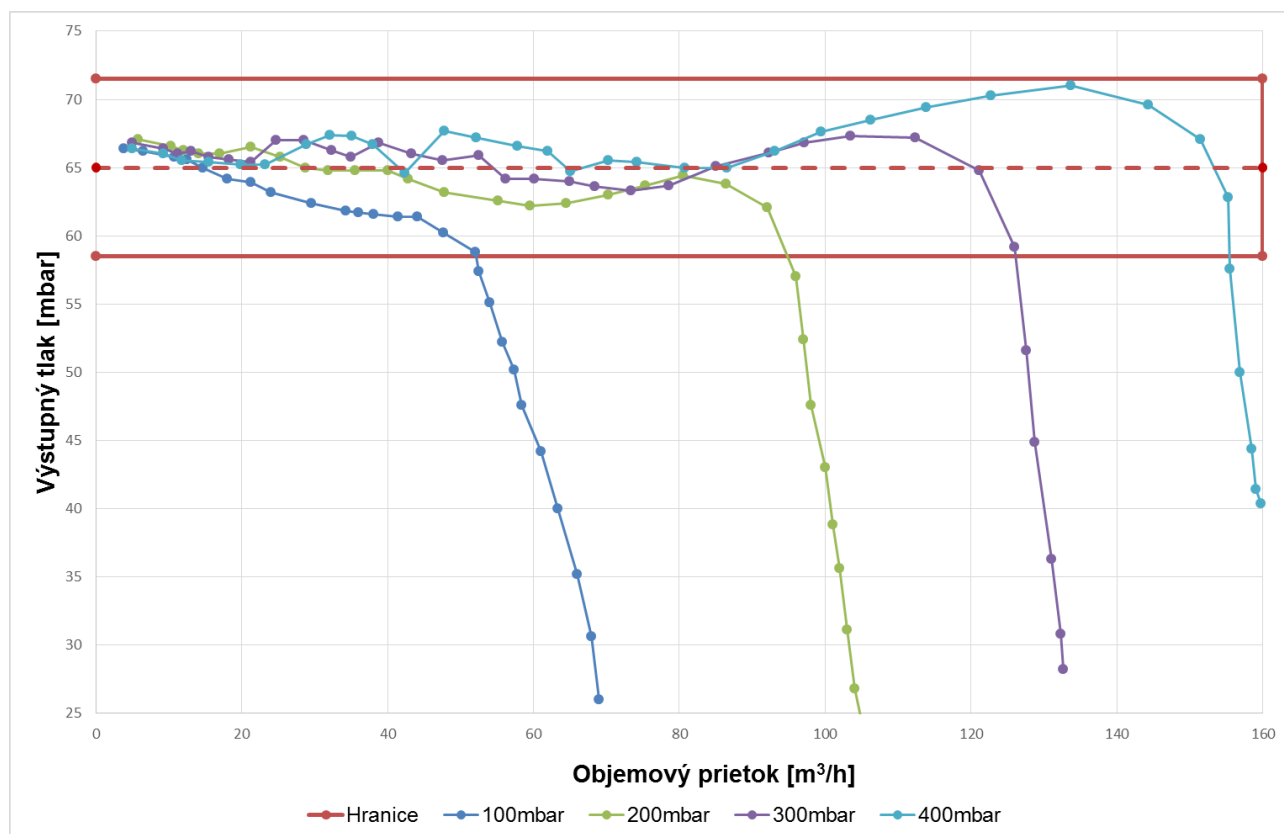


**Obrázok 20:** Detail pripojenia regulátora GDJ 25 do meracej trate počas merania prietokovej charakteristiky

Na vstup bol privedený vstupný tlak, ktorý bol počas celej skúšky udržiavaný na predpísanej, konštantnej hodnote. Na vytvorenie 4 prietokových charakteristík bola celá skúška zopakovaná postupne pri vstupných tlakoch 100 mbar, 200 mbar, 300 mbar a 400 mbar. Stabilita vstupného tlaku bola zabezpečovaná dvoma samostatnými nastaviteľnými vysokotlakými regulátormi, ktoré sa v trati nachádzajú pred meraným telesom.

Pomocou ventilu za telesom (*obrázok 17 - 8*) bol ručne nastavovaný prietok plynu sústavou. Pri vstupnom tlaku 100 mbar bol prietok najprv postupne zvyšovaný a po dosiahnutí možného maxima bol opäť znižovaný. Pri zvyšných tlakoch bola skúška vykonaná len pri postupnom zvyšovaní tlaku. Prietokomer (*obrázok 17 - 3*) sa v systéme nachádza pred vstupom do telesa.

Tlakomerom (*obrázok 17 - 5*) za telesom bola meraná hodnota výstupného tlaku. Tá sa mala v ideálnom prípade pohybovať s malým rozptylom okolo hodnoty 70 mbar. Jednotlivé namerané body boli vynesené do grafu na *obrázku 21*.



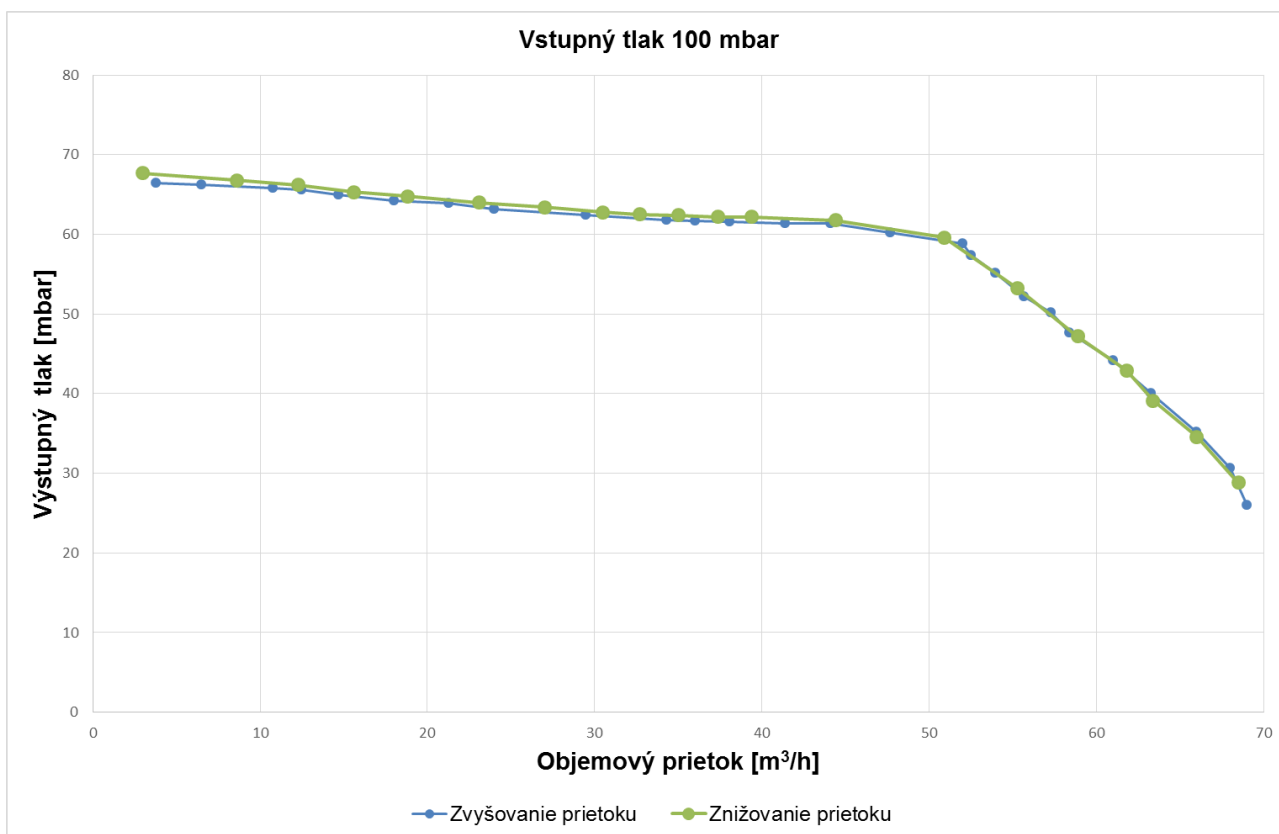
**Obrázok 21:** Prietoková charakteristika regulátora GDJ 25 pre vstupné tlaky 100 mbar, 200 mbar, 300 mbar a 400 mbar. Hranice označujú dovolený rozptyl tlakov 65 mbar  $\pm$  10%

Z obrázku 21 je vidieť, že väčšinou bol výstupný tlak nižší ako požadovaných 70 mbar. Na priebehu charakteristík je možné rozlíšiť funkčné pásmo pre jednotlivé tlaky. Takisto je vidieť pásmo priškrtienia prietoku, v ktorom už regulátor neplní svoju úlohu.

Na základe týchto nameraných hodnôt je možné posúdiť vhodnosť daného modelu pre konkrétne použitie. Čiže ak zákazník potrebuje znížiť tlak zo 100 mbar na približne 70 mbar pri nízkych prietokoch, ktoré sa pohybujú v rozmedzí do cca 50 m³/h je tento regulátor vhodný. Ak ale potrebuje vyšší prietok (napríklad nad 100 m³/h), je preňho tento regulátor nepoužiteľný.

Pre vstupný tlak 100 mbar bola skúška vykonaná najprv pri zvyšovaní prietoku a následne pri znižovaní. Namerané hodnoty sú v grafe na obrázku 22, nižšie. Je vidieť, že hodnota výstupného tlaku bola pri znižovaní prietoku vždy o niečo vyššia ako v druhom prípade. Bolo overené hysterézne správanie regulačného zariadenia.





**Obrázok 22:** Hysterézia prietokovej charakteristiky regulátora GDJ 25 pri vstupnom tlaku 100 mbar

## 8. Tvorba 3D modelu

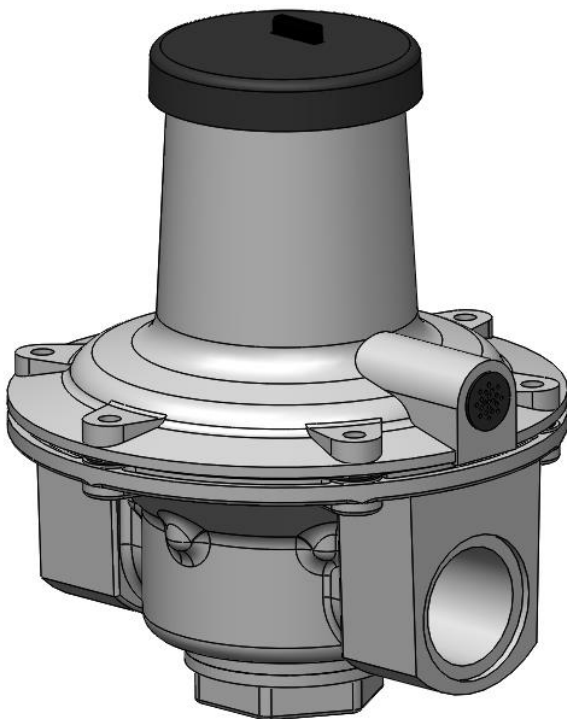
Pri vyvíjaní nového typu regulátora alebo vylepšovaní už existujúceho je potrebné každú zmenu otestovať. Určiť, či ide o pokrok k lepšiemu výrobku alebo nie. Najjednoduchšie ako overiť vlastnosti nového návrhu je vytvoriť dostatočne presný počítačový model. Ten následne podrobiť simulácií pri vhodných podmienkach. Z výsledkov teoretickej simulácie sa dá určiť, či má zmysel ďalej sa zaoberať vykonanou zmenou alebo sa vydať inou cestou. Podľa výsledkov sa môže ďalej upraviť počítačový model a simulácie opakovať, alebo sa môže dať vyrobiť prototyp a otestovať jeho vlastnosti v skutočných podmienkach. Výroba prototypu pre každú jednu úpravu, ktorej funkčnosť ešte nie je známa, je zbytočne finančne náročná. Pristupuje sa k nej teda až vtedy, keď je jasne odôvodnená.

Práve snaha o vylepšenie už existujúceho jednostupňového regulátora GDJ 25 bola dôvodom na vytvorenie jeho 3D modelu. Model bol vytvorený na základe výkresovej dokumentácie v programe SolidWorks Premium 2014.

Zoznam vytvorených častí sa nachádza nižšie v tabuľke 3. Jednotlivé časti sú zobrazené v prílohách na konci dokumentu.

Tabuľka 3: Zoznam častí

Názov:	Číslo prílohy:
Vrchný kryt	1
Spodné teleso	2
Spodná zátk	3
Impulzná rúrka	4
Primárna membrána	5
Sekundárna membrána	6
Bezpečnostná membrána	7
Vložka ventilu	8
Držiak taniera ventilu	9
Tanier ventilu	10
Membránová vložka	11
Membránová doska	12
Odvzdušňovacie sítko	13
Pružina	14
Nastavovacia skrutka	15
Horná krytka	16
Držiak pružiny	17
Uzatváracia páka	18
Puzdro pre nastavovaciu skrutku	19
Podložka k nastavovacej skrutke	20
Podložka tesniaca	21
Vstupná/Výstupná prípojka	22



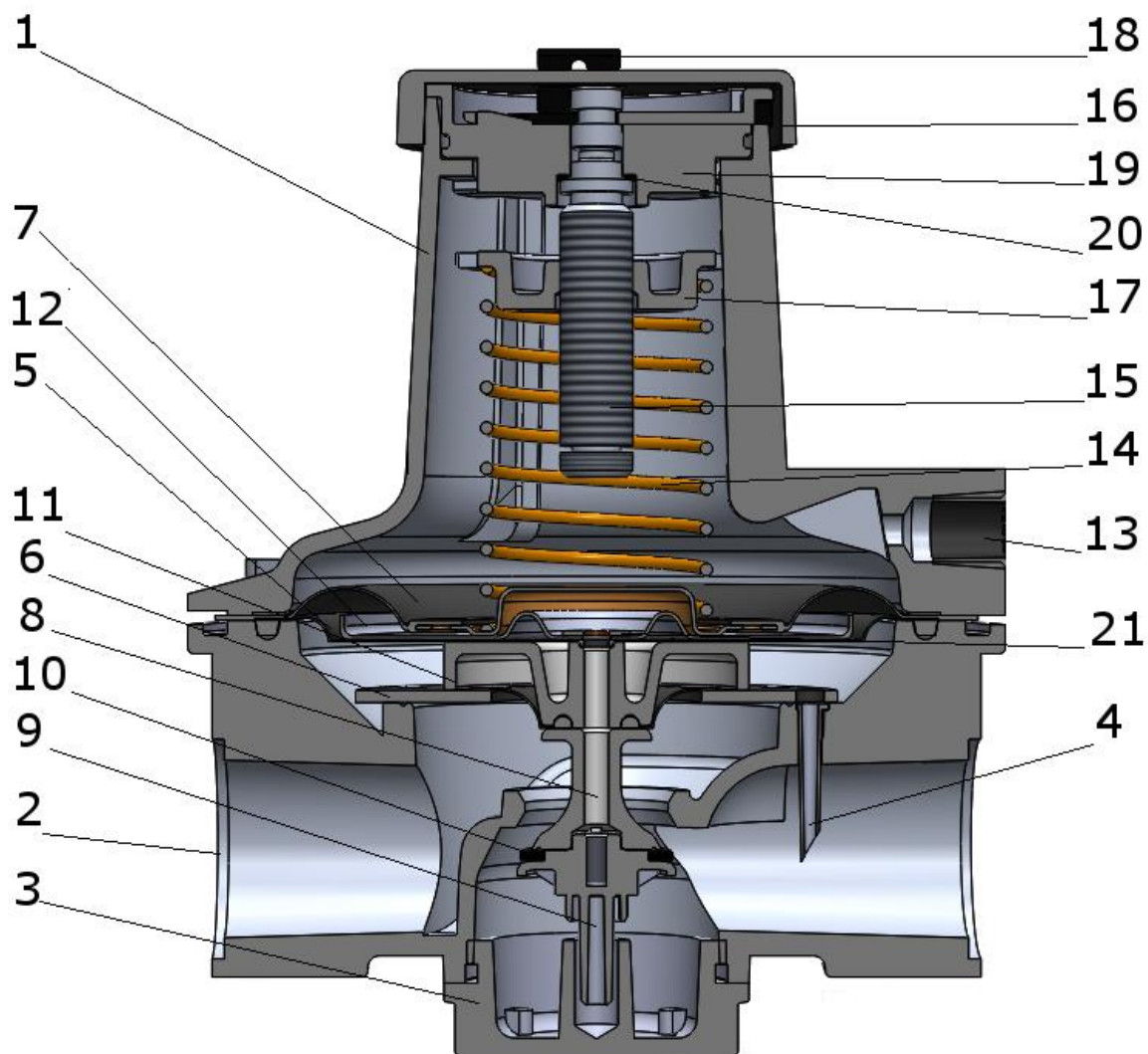
**Obrázok 23:** Model regulátora GDJ 25



**Obrázok 24:** Skutočný regulátor GDJ 25

Oproti reálnemu výrobku je model zjednodušený. Na *obrázku 24* je fotografia reálneho regulátora, na ktorom sú vidieť viaceré nadbytočné prvky, ktoré sa na modeli (*obrázok 23*) nenachádzajú. Na zníženie nákladov výroby sa, napríklad používa rovnaká forma, na odlievanie vrchného krytu, pre viacero typov regulátorov a bezpečnostných prvkov. Na odliatku z tejto formy sa nachádzajú prvky určené na ďalšie obrobenie, ktoré závisí od konkrétneho modelu. Pri niektorých modeloch po obrobení ostanú na telese nevyužitú, nadbytočné prvky. Všetky takéto časti, určené pre iný typ regulátora, boli pri tvorbe modelu odstránené.

Prvky, ktoré počas prevádzky menia svoju geometriu boli v modeli vytvorené tak, aby sa ich tvar prispôboval polohe ventilu. Všetky tri membrány sú na okrajoch pevne prichytené k telesu regulátora a ich stredy sa pohybujú spolu s ventilom. Od polohy ventilu takisto závisí stlačenie pružiny. Jednotlivé časti sú vytvorené ako tuhé, nestlačiteľné telesá. Ich tvar sa nebude meniť, aj keď na ne bude pôsobiť sila. Prúdenie, na ktorého simuláciu bol model vytvorený, prebieha iba v časti nižšie od primárnej membrány. Keďže membrány boli vymodelované ako tuhé telesá a prúdenie vo vrchnej časti neprebieha, pružina nie je funkčná. Jej úloha v modeli je iba vizuálna, nemá pridelený materiál a teda nemá ani vlastnú tuhosť.



**Obrázok 25:** Rez modelom

- 1 - Vrchný kryt
- 2 - Spodné teleso
- 3 - Spodná zátka
- 4 - Impulzná rúrka
- 5 - Primárna membrána
- 6 - Sekundárna membrána
- 7 - Bezpečnostná membrána
- 8 - Vložka ventilu
- 9 - Držiak taniera ventilu
- 10 - Tanier ventilu
- 11 - Membránová vložka
- 12 - Membránová doska
- 13 - Odvzdušňovacie sítko
- 14 - Pružina
- 15 - Nastavovacia skrutka
- 16 - Horná krytka
- 17 - Držiak pružiny
- 18 - Uzatváracia páka
- 19 - Puzdro pre nastavovaciu skrutku
- 20 - Podložka k nastavovacej skrutke
- 21 - Podložka tesniaca

## 9. Overenie funkčnosti modelu

Ako najzrejmější možnosť zrovnania modelu a reálneho telesa sa javí porovnanie prietokových charakteristík vytvorených pre oba prípady. Ako okrajové podmienky simulácie by bol nastavený vstupný tlak, požadovaný výstupný tlak a sledovaný parameter by bol prietok. Alebo by bol zadáný vstupný tlak a, prietok podľa už nameranej charakteristiky pre reálne teleso, výsledkom by bol potom výstupný tlak. Problém je, že pri tvorbe simulácie existuje ešte jedna premenná - poloha ventilu. Určiť stlačenie pružiny alebo priamo polohu ventilu v čase keď zariadením prúdi plyn je náročné a bez zásahu do telesa nemožné. Je teda potrebné nájsť iný spôsob ako porovnať model so skutočnosťou.

Ďalší parameter charakterizujúci daný regulátor je tuhosť jeho pružiny. Od tejto pružiny priamo závisia regulačné schopnosti ovládacieho zariadenia.

Určiť tuhosť pružiny na reálnom zariadení je jednoduché. Jej hodnota je uvedená vo výrobných výkresoch a následne bola aj overená meraním.



Obrázok 26: Meranie tuhosti pružiny

Spôsob akým sa určuje tuhosť pružiny vychádza priamo z jej definície. Je teda potrebné určiť silu, ktorou pôsobí pri určitom stlačení. Pružina je uložená do stojanu meracieho prístroja (obrázok 26), kde je postupne stláčaná. Silomerom bola zmeraná sila [N], ktorou pôsobí a odchýlkomerom bolo určené jej stlačenie [mm]. Takto bolo zmeraných viacero bodov, ktoré boli v grafe preložené lineárnou aproximáciou. Smernica priamky je potom priamo rovná hodnote tuhosti pružiny [N/mm]. Keďže je závislosť medzi stlačením a silou lineárna, na určenie tuhosti by stačilo zmerať iba jeden bod, druhým je počiatok – nulové stlačenie vyvolá nulovú silu. No v takom prípade by výsledná hodnota mohla byť zaťažená chybou

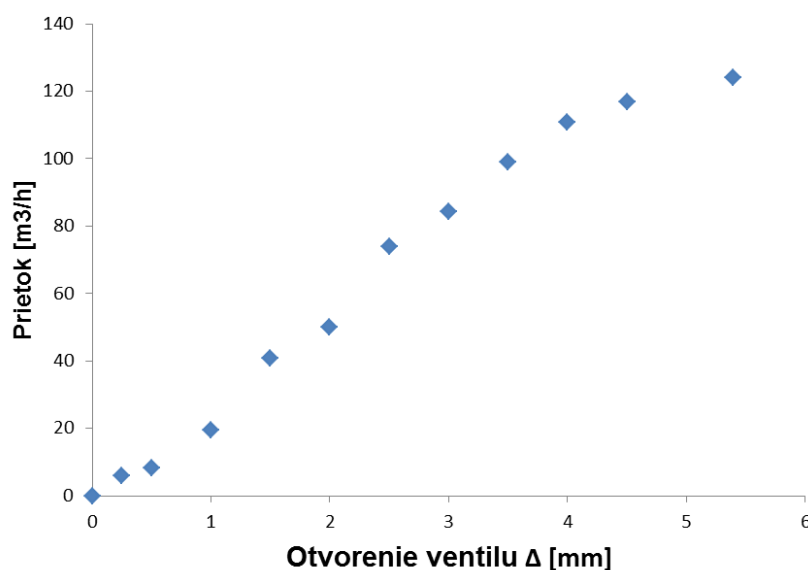
Ako už bolo povedané, pružina v modeli nie je funkčná. No na základe posunutia ventilu a sily, ktorá pôsobí zospodu na pružinu, je možné navrhnúť jej vlastnosti. Na určenie tuhosti je potrebné poznať stlačenie a silu, ktorá ho vyvolá. Stlačenie pružiny je dané polohou ventilu.

Pri ustálenom stave je v regulátore silová rovnováha (viď kapitola 3) a sily pôsobiace na primárnu membránu sú vyrovnané práve silou od pružiny.

Poloha ventilu je jednoducho nastaviteľná väzbou v modeli. Sila pôsobiaca na pružinu však závisí od viacerých faktorov a je potrebné ju vypočítať. Na určenie sily bolo prevedených viacero simulácií prúdenia v systéme.

### 9.1 Prvé overenie funkčnosti

Po vytvorení 3D modelu bolo potrebné vytvoriť jednoduchú výpočtovú úlohu, ktorá by ukázala že je model správne nakreslený a odstrániť chyby vzniknuté pri jeho tvorbe a skladaní. Ako prvé overenie bola vytvorená séria simulácií prúdenia v programe SolidWorks Premium 2014 - Flow Simulation, ktorých výsledkom je závislosť medzi polohou ventilu a objemovým prietokom plynu. Ako okrajové podmienky boli zadané vždy tie isté výstupné a vstupné tlaky. Výpočtová sieť bola ponechaná na prednastavených hodnotách, bez dodatočného zjemňovania. Pri tvorbe týchto simulácií boli prerobené niektoré časti modelu (napríklad tvar impulznej rúrky) tak, aby sa navzájom prekrývali, vďaka čomu bude celý model vzduchotesný. Takisto boli z výpočtovej oblasti odstránené všetky časti modelu, v ktorých prúdenie neprebíha. Výsledná závislosť vyšla podľa očakávaní, so zväčšujúcim sa otvorením ventilu sa zvyšuje objemový prietok telesom (obrázok 27).



**Obrázok 27:** Závislosť medzi objemovým prietokom plynu a otvorením ventilu pri vstupnom tlaku 400 mbar a výstupnom tlaku 70 mbar

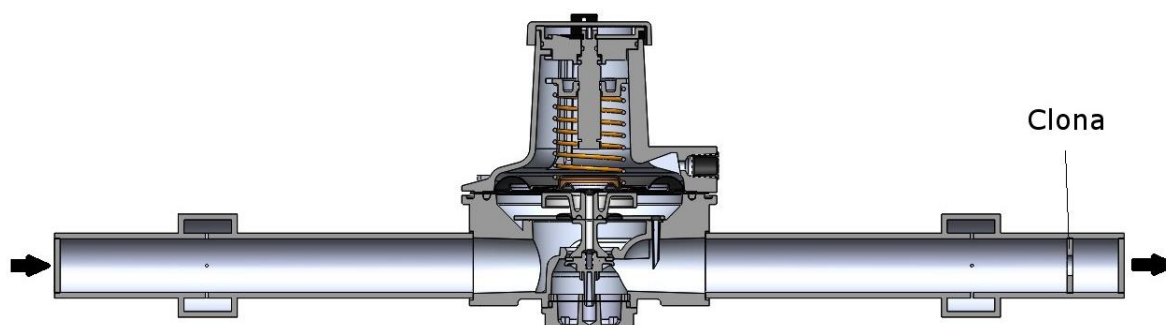
### 9.2 Simulácia prúdenia – určenie sily

Ako druhé overenie funkčnosti bolo navrhnuté zistenie tuhosti pružiny. Na určenie sily bola navrhnutá optimalizačná úloha, ktorej cieľom bolo čo najvernejšie napodobniť podmienky v systéme počas jeho prevádzky.

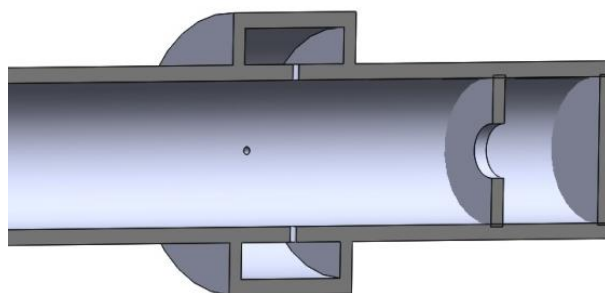
Na vytvorenie simulácie boli v systéme vykonané úpravy, ktoré vyplynuli z prvého overenia a aby sa simulácia priblížila skutočnosti, k telesu regulátora boli pridané prípojky – vstupná a výstupná. Pri konci výstupnej prípojky bola pridaná clona s otvorom (obrázok 28 a 29). Táto clona sa správa ako ďalší škrtiaci prvok a veľkosť otvoru reguluje prietok systémom, podobne ako tomu pri praktickom



meraní prietokovej charakteristiky kedy sa jedným ventilom riadila hodnota vstupného tlaku a druhým prietoku.



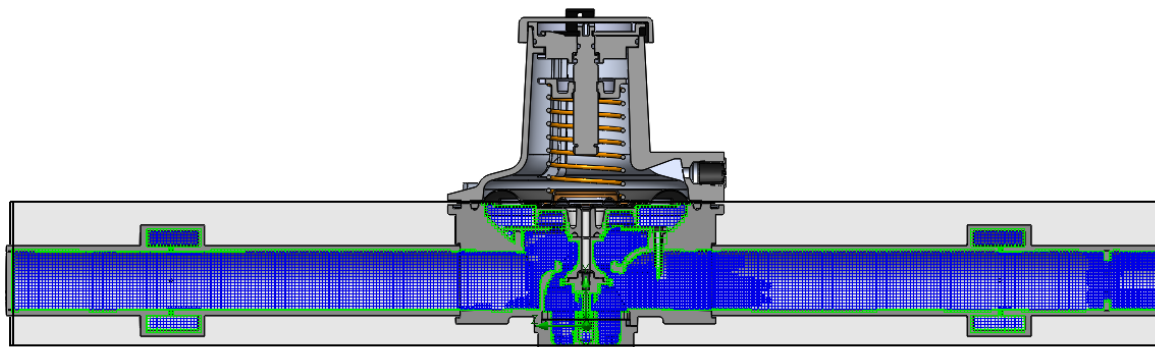
**Obrázok 28:** Teleso s prípojkami a škrtiacou clonou



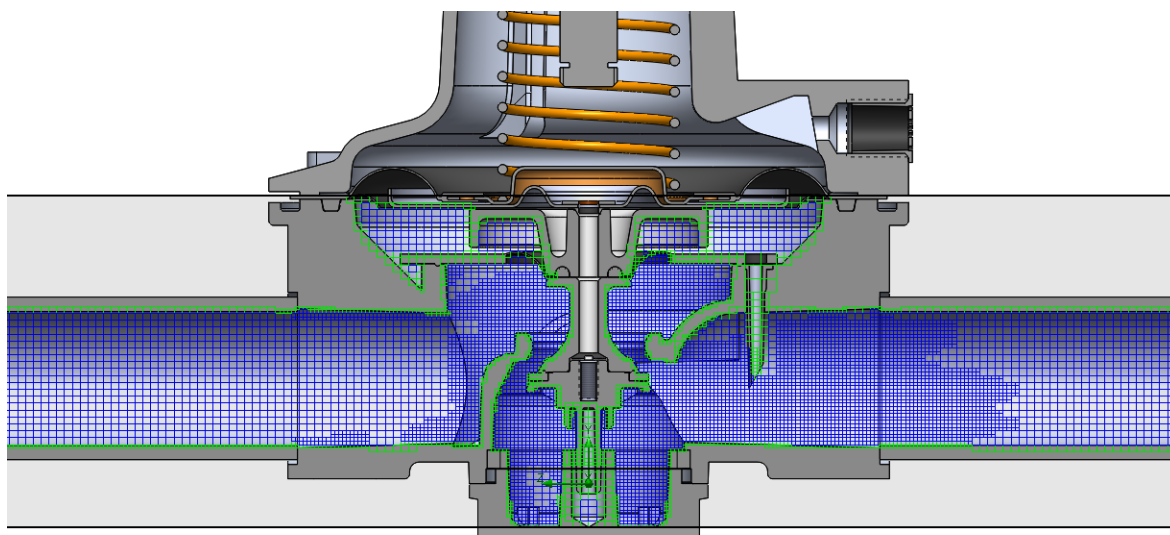
**Obrázok 29:** Detail škrtiacej clony

Optimalizačná úloha bola vykonaná pre vstupný tlak 100 mbar pre minimálne viacero rôznych polôh ventilu.

Pri každej úlohe bola rovnako nastavená globálna výpočtová sieť a lokálna, zjemnená sieť v okolí ventilu a jeho sedla (*obrázok 30 a 31*).

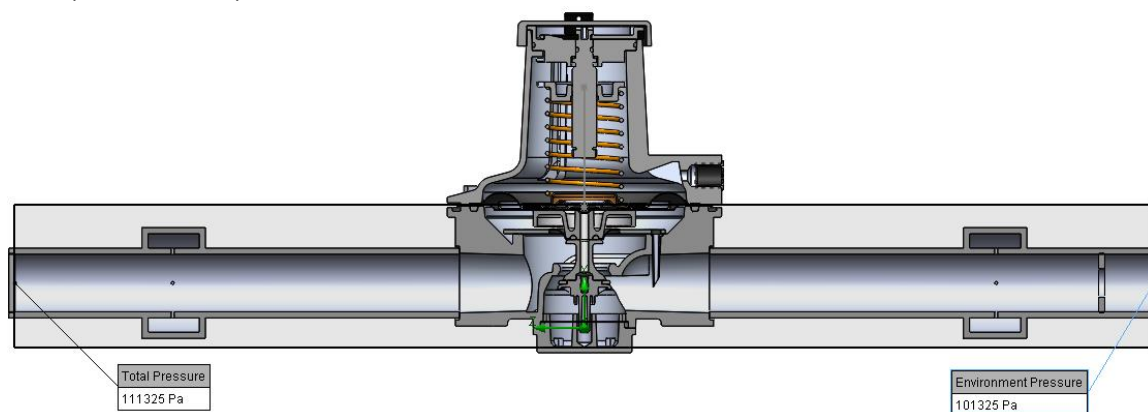


**Obrázok 30:** Výpočtová oblasť so sieťou (zelené sú neúplné prvky siete na rozhraní medzi telesom a prúdiacim plynom, modré sú úplné)



**Obrázok 31:** Detail zjemnenia siete v okolí ventilu

Cieľom optimalizačnej úlohy bolo určiť prietok zariadením tak, aby pri zadanom vstupnom tlaku bol výstupný tlak znížený na požadovanú hodnotu. Číže výsledkom výpočtu by mal byť priemer otvoru v clone. Tento priemer by mal byť taký, aby pri danom skúmanom vstupnom tlaku a polohe ventilu, bola hodnota výstupného tlaku v rozmedzí  $70 \pm 0,1$  mbar (pretlak voči atmosférickému). Hodnota výstupného tlaku je pri reálnom meraní snímaná na obruči výstupnej prípojky. V prípade optimalizačnej úlohy je táto požadovaná hodnota, zadaná ako vstupný parameter pre výpočet, priradená vnútornej ploche obruče výstupnej prípojky. Ako okrajové podmienky úlohy bola vstupnému otvoru pridelená absolútna hodnota vstupného tlaku a na druhej strane, na výstupe zo zariadenia, atmosférický tlak (obrázok 32).



**Obrázok 32:** Okrajové podmienky

Ďalej bola nastavená poloha ventilu a rozpätie hodnôt, v ktorom sa môže pohybovať priemer otvoru v clone. Maximálny priemer otvoru je rovný vnútornému priemeru prípojky a minimálny bol nastavený na 1 mm. Po niekoľkých vykonaných simuláciách bolo toto rozpätie zúžené na skrátenie výpočtového času.

Program počas výpočtu postupuje tak, že si zvolí nejaký priemer otvoru v clone, prepočíta podmienky prúdenia v celej výpočtovej oblasti a určí výslednú hodnotu výstupného tlaku  $p'_{out}$ . Následne hodnotu  $p'_{out}$  porovná so zadaným in-



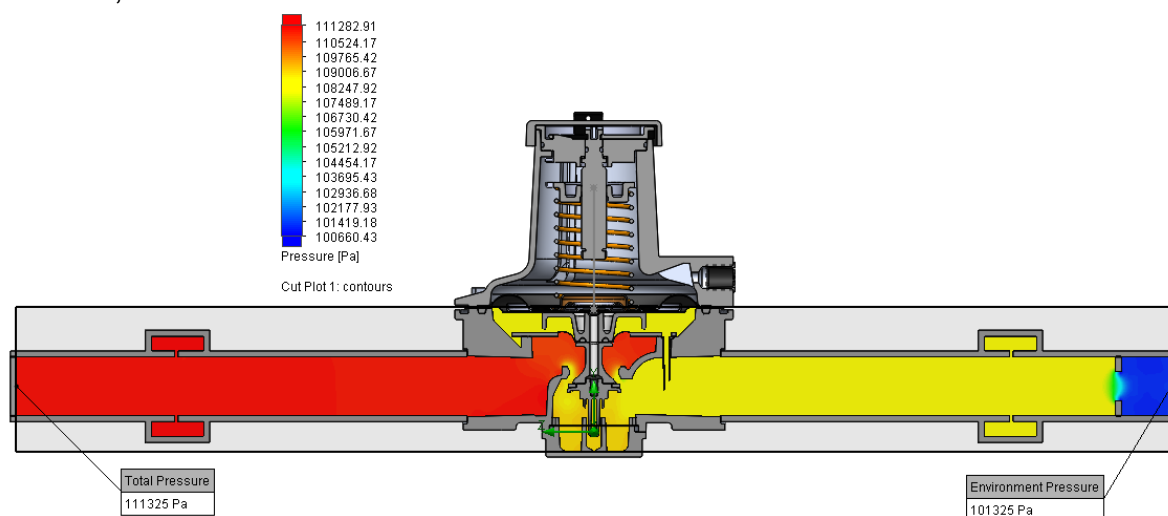
tervalom. Ak hodnota nespadá do povoleného intervalu, určí či je vyššia alebo nižšia, na základe tohto rozdielu potom zväčší alebo zmenší priemer otvoru a celý výpočet beží nanovo. Toto sa opakuje tak dlho, až kým nebude  $p'_{out}$  v požadovanom intervale. Prvá zvolená hodnota priemeru bola vždy najväčšia možná, nasledujúca bola vždy najmenšia možná. Overením hraničných hodnôt sa určuje existencia riešenia. V tomto prípade bola vždy vypočítaná hodnota  $p'_{out}$  pri maximálnom priemere výrazne nižšia ako požadovaná a pri minimálnom priemere zase vyššia. Požadované riešenie sa teda nachádza niekde medzi týmito dvoma.

Pre niektoré polohy ventilu, blízke úplnému otvoreniu, bol prietok telesom príliš veľký a riešenie pri týchto podmienkach nebolo nájdené.

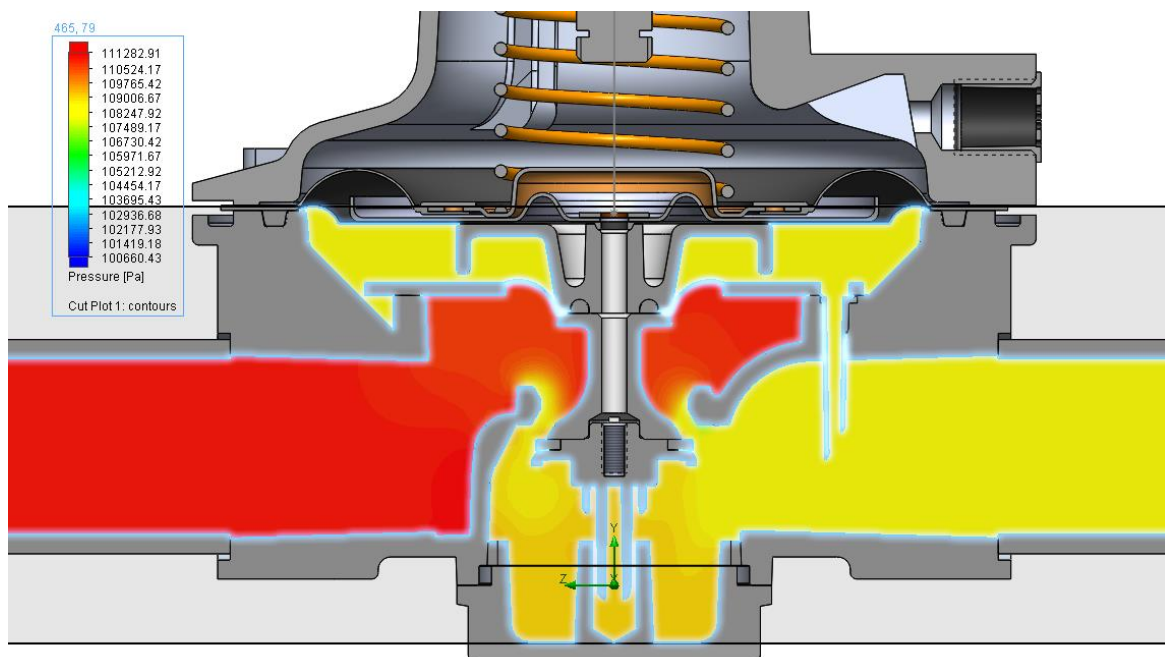
Z výsledkov jednotlivých optimalizačných úloh boli vytvorené samostatné projekty. V týchto projektoch boli, už z optimalizácie, vypočítané priebehy prúdenia, rýchlosti, tlaky, sily pôsobiace na jednotlivé plochy a ďalšie parametre. Stačilo ich už len načítať a vykresliť.

Z množstva vypočítaných parametrov boli vybrané len niektoré. Konkrétne priebeh tlakov, trajektória a rýchlosť prúdiacich častíc, prietok výstupným otvorom, tlak na vnútornej ploche obruče výstupnej prípojky (na overenie) a sila, ktorá stláča pružinu.

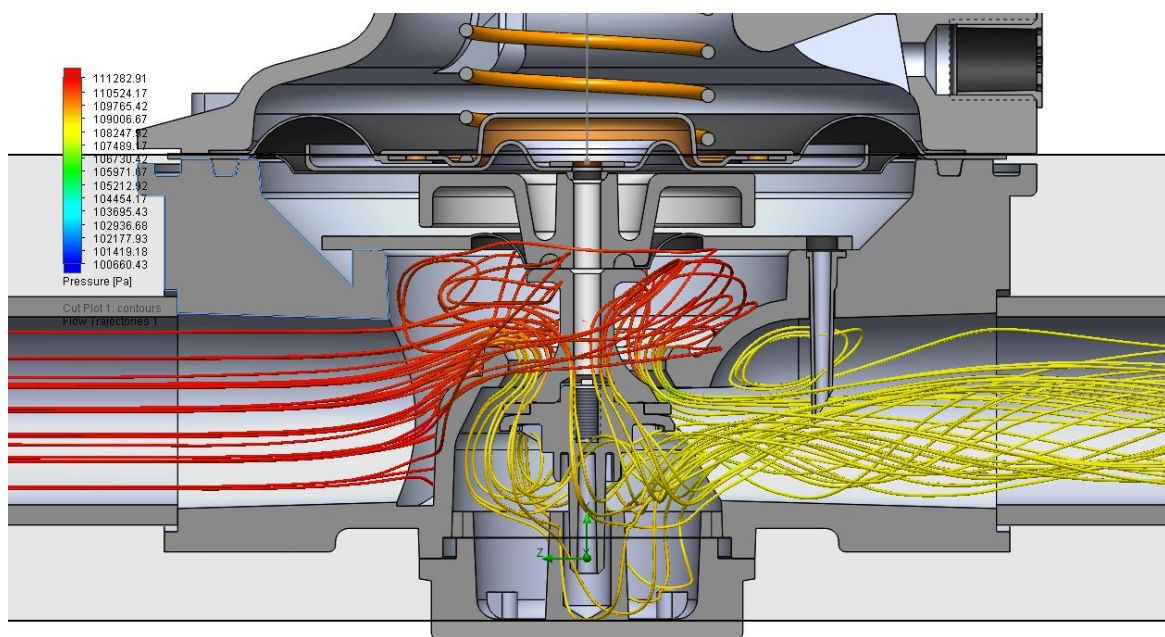
Jednotlivé parametre sú pre vstupný tlak 100 mbar a otvorenie ventilu  $\Delta=4$  mm, zobrazené nižšie.



**Obrázok 33:** Priebeh tlaku s systému pri absolútnom vstupnom tlaku  $p'_{in}=111325$  Pa



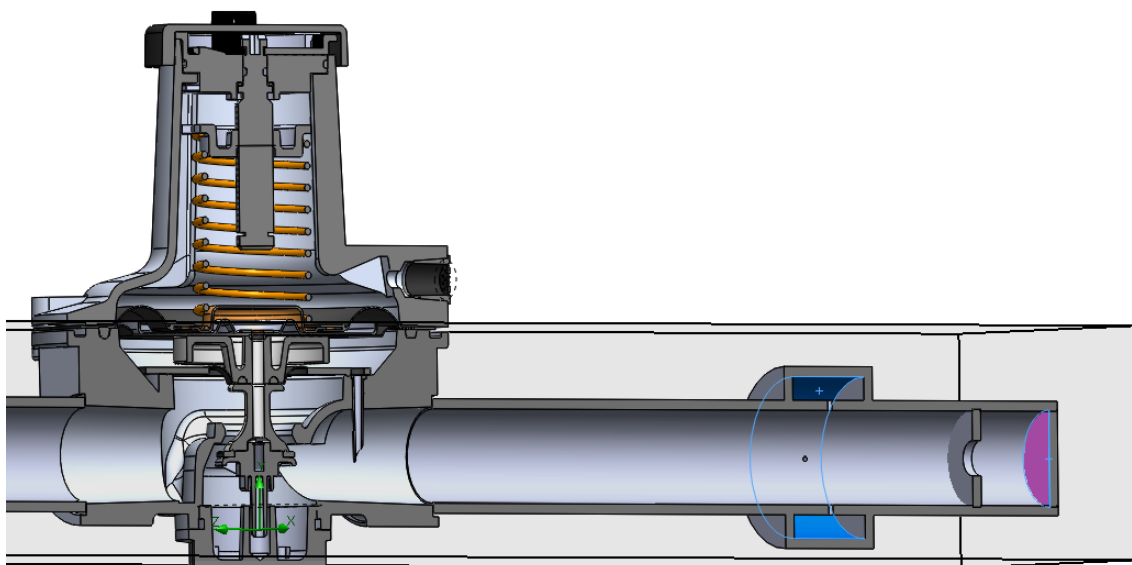
**Obrázok 34:** Detail priebehu tlaku v okolí ventilu



**Obrázok 35:** Trajektórie a rýchlosti prúdiacich častíc

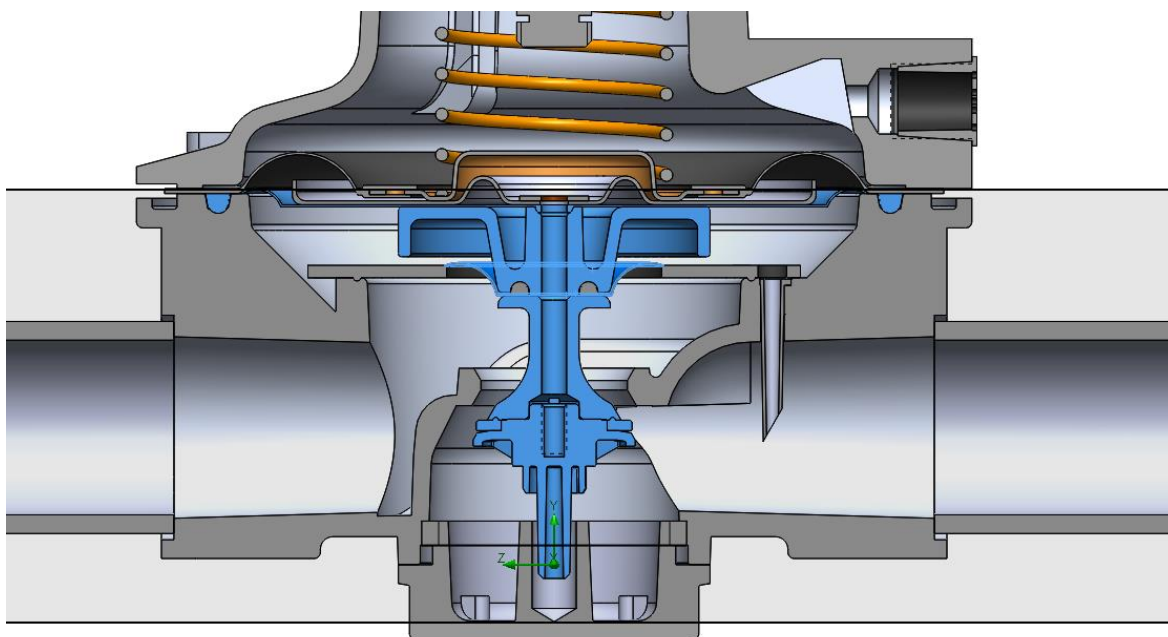
Na overenie bola zobrazená aj finálna hodnota  $p'_{out}$ . Na *obrázku 35* je modrou farbou zvýraznená plocha, na ktorej bola hodnota  $p'_{out}$  určovaná. Pre vstupný tlak  $p'_{in}=111325$  Pa je  $p'_{out}=108317$  Pa, čo znamená že v tomto mieste je pretlak voči atmosfére 6892 Pa (68,92 mbar). Bolo teda ešte raz overené, že hodnota výstupného tlaku spadá do povolených hraníc.

Výstupným otvorom (na *obrázku 36* fialový) preteká 44,34 m<sup>3</sup>/h plynu.



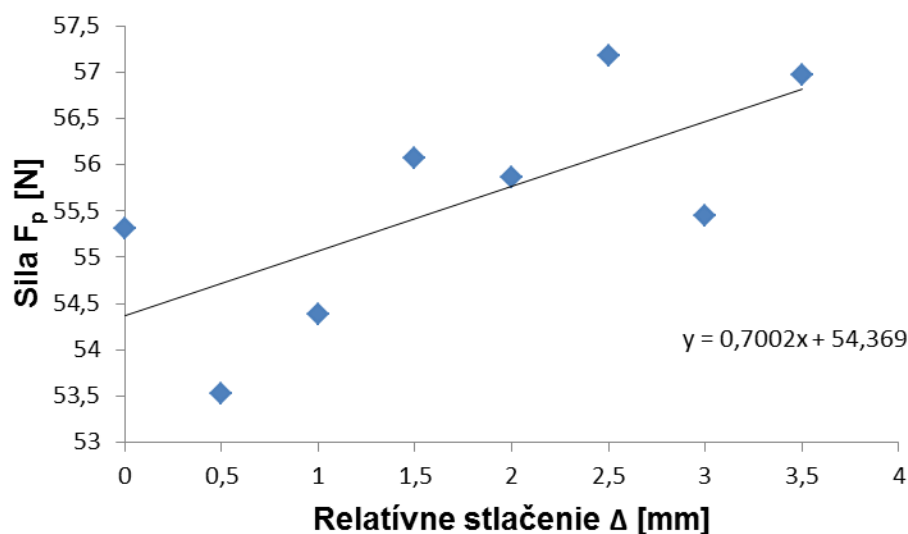
Obrázok 36 Miesto určenia výstupného tlaku  $p'_{out}$  (modré) a prietoku (fialová)

Najdôležitejší sledovaný parameter pre určenie funkčnosti modelu je sila, ktorá pôsobí na pružinu. Tá bola určená ako výslednica všetkých síl, ktoré pôsobia na pohyblivé časti v regulátore. Ako časti pre ktoré má byť vypočítaná výsledná sila bolo vybrané celé teleso ventilu (tanier ventilu, vložka ventilu a držiak taniera ventilu), celá primárna membrána, membránová vložka a pohyblivá časť sekundárnej membrány. Na *obrázku 37* sú tieto časti zvýraznené modrou.



Obrázok 37 Pohyblivé časti regulátora na ktorých je určovaná sila stláčajúca pružinu

Závislosť sily, vypočítanej zo simulácie, a polohy ventilu je zobrazená na grafe na *obrázku 38*. Jednotlivé body boli preložené lineárnou aproximáciou. Tak ako aj pri reálnej pružine, smernica preloženej priamky je tuhosť pružiny.  $F_p = k\Delta$



**Obrázok 38:** Závislosť medzi stlačením pružiny a silou vyvolávajúcou stlačenie

Tuhosť pružiny vypočítaná pomocou simulácie prúdenia je 0,7 N/mm. Tuhosť deklarovaná vo výrobných výkresoch je  $k=0,61$  N/mm. To je rozdiel takmer 15%.

Existuje viacero záverov, ktoré sa dajú vyvodiť z tohto rozdielu. Každému variantu by bolo vhodné sa ďalej venovať a na základe analýzy potom ďalej vylepšovať výpočtový model alebo navrhnúť iné postupy overenia jeho funkčnosti.

Použitá metodika overovania funkčnosti modelu sa väčšinou využíva na modely dvojstupňových regulátorov, na jednostupňový model bola využitá pri tejto práci prvý krát. Bolo by vhodné zopakovať rovnakú úlohu pre viacero polôh ventilu a pre rôzne vstupné tlaky. Pri simulácií nebola overená kvalita výpočtovej siete, bolo by vhodné ju pre ďalšie použitie modelu overiť a zdokonaľiť. Takisto je možné vylepšiť tvar modelu, ktorý nie je úplne verný svojej skutočnej predlohe a obsahuje iba tuhé prvky. Ďalšou z možností ako overiť funkčnosť modelu by mohlo byť vytvorenie rovnakých optimalizačných úloh, ale namiesto určovania priemeru otvoru v clone, by výsledkom bola poloha ventilu.

## Záver

Spoľahlivá a presná regulácia plynu je nevyhnutná na správne fungovanie všetkých sústav pracujúcich s plynmi pod tlakom. Či už ide o veľké plynovodné sústavy so zemným plynom, domáce kúrenie alebo kyslíkové bomby potápačov, ich funkčnosť závisí od správnej regulácie charakteristík plynu, s ktorým pracujú.

Každé regulačné teleso musí vyhovieť kritériám bezpečnostných záťažových skúšok a musí byť schopné, v svojej triede presnosti, regulovať vstupný tlak plynu na požadovanú výstupnú hodnotu. Jednotlivé typy regulátorov sú definované svojimi prietokovými charakteristikami. Prietoková charakteristika určuje regulačné schopnosti zariadenia. Je to závislosť medzi prietokom plynu telesom a výstupným tlakom, určovaná pre jeden konkrétny vstupný tlak. Prietoková charakteristika bola nameraná pre štyri rôzne vstupné tlaky. Postup merania a výsledky sú v kapitole 7. Pre každý vstupný tlak je na základe prietokovej charakteristiky možné určiť funkčné pásmo regulátoru, v ktorom by sa mali pohybovať hodnoty objemového prietoku plynu telesom aby výstupný tlak spadol do dovoleného rozpätia hodnôt. Na základe správne zostavenej prietokovej charakteristiky sa určuje vhodnosť daného typu regulátoru pre konkrétne použitie.

Pri vývoji nových regulačných zariadení, alebo vylepšovaní už existujúcich, sa v praxi využívajú simulácie prúdenia na 3D numerických modeloch regulačných telies.

Aby bolo možné vylepšiť už existujúci typ regulátoru GDJ 25, bol najprv vytvorený jeho model, na ktorom môžu byť jednoducho vykonané technologické zmeny. Výhodou modelových simulácií je časová a finančná nenáročnosť a možnosť vyskúšať každú navrhovanú zmenu. 3D model regulátoru GDJ 25 bol vytvorený na základe výkresovej dokumentácie jeho jednotlivých súčiastok v programe SolidWorks. Výkresová dokumentácia bola pomerne stará a nedostatočne presná, kvôli čomu boli rozmery niektorých častí iba približné, vytvorené na základe porovnania so skutočným regulátorom.

Následne bolo potrebné overiť funkčnosť modelu, zistiť či bol správne vytvorený a či je vhodný na ďalšie využitie. Ako prvé overenie správnosti boli vytvorené simulácie prúdenia, v ktorých bol zadáný vždy rovnaký vstupný a výstupný tlak, menila sa poloha ventilu a sledovaným parametrom bol objemový prietok telesom. Na základe týchto simulácií bolo overené vzduchotesné uzavretie modelu a bola upravená jeho geometria. Takisto bola, pre ďalšie výpočty, upravená výpočtová oblasť simulácie tak, že z nej boli odstránené časti telesa, v ktorých prúdenie plynu neprebíha.

Ako druhé overenie boli vytvorené optimalizačné úlohy, ktoré na základe zadaného vstupného tlaku a požadovaného výstupného tlaku určili pre jednotlivé polohy ventilu potrebný prietok plynu telesom. Z jednotlivých výpočtov bola potom určená sila, ktorou pôsobí plyn na tlačnú pružinu. Na základe polohy ventilu a vypočítanej sily bola potom určená tuhosť pružiny, ktorá by sa mala v telese nachádzať.

Rozdiel medzi vypočítanou tuhosťou pružiny a tuhosťou používanej skutočnej pružiny bol takmer 15%. Vypočítaná tuhosť bola 0,7 N/mm oproti 0,61 N/mm, hodnote uvedenej vo výrobných výkresoch.

Nasledujúcimi krokmi by mohli byť úpravy tvaru modelu, ďalšie simulácie prúdenia pre iné vstupné tlaky, náročnejšie výpočty pri prísnejších podmienkach a vyššej presnosti simulácie alebo vyskúšanie iného postupu overenia. Možnosť ako zdokonaľiť vytvorený model, vylepšiť jeho funkčnosť čím sa zvýši presnosť výsledkov je viacero a pre ďalšiu prácu s modelom by bolo vhodné ich vyskúšať.

## Zoznam použitých zdrojov

- [1] Plynárenství: Dodávka energie. *Moje energie* [online]. Praha: Done [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/plynarenstvi-dodavka-energie>
- [2] PATEL, Pravin D. *Training Program: Basic Regulator Concept*. Elster Jeavons, 2002.
- [3] JURY, Floyd D. *Fundamentals of Gas Pressure Regulation*. Fisher Technical monograph 27. Marshalltown, Iowa: Fisher Controls International, 1972, s. 13.
- [4] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury*. Praha: Informatorium, 2002, 253 s. : il. ISBN 80-7333-000-8.
- [5] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. Škrcení plynů a par, *Transformační technologie*, 2006-01, [last updated 2016-07-18]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/37.html>.
- [7] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0
- [8] Měření mechanických veličin. *E-automatizace: Informační portál z oblasti automatizace* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/>
- [9] Bourdon tubes: Introduction. *EFunda* [online]. Sunnyvale, CA: eFunda [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://www.efunda.com/designstandards/sensors/bourdon\\_tubes/bourdon\\_intro.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/bourdon_tubes/bourdon_intro.cfm)
- [10] STN EN 13611. *Bezpečnostné a ovládacie zariadenia horákov a spotrebičov na plynné alebo kvapalné palivá: Všeobecné požiadavky*. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, c2017.
- [11] Basics of Pressure Regulator. In: Beswick [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.beswick.com/basics-pressure-regulators>
- [12] Návod k provozu: Regulátor tlaku plynu 60DJ, J78R, GDJ. *Docuthek* [online]. Elster, 2015 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=en&doc=52071>



## Zoznam použitých skratiek a symbolov

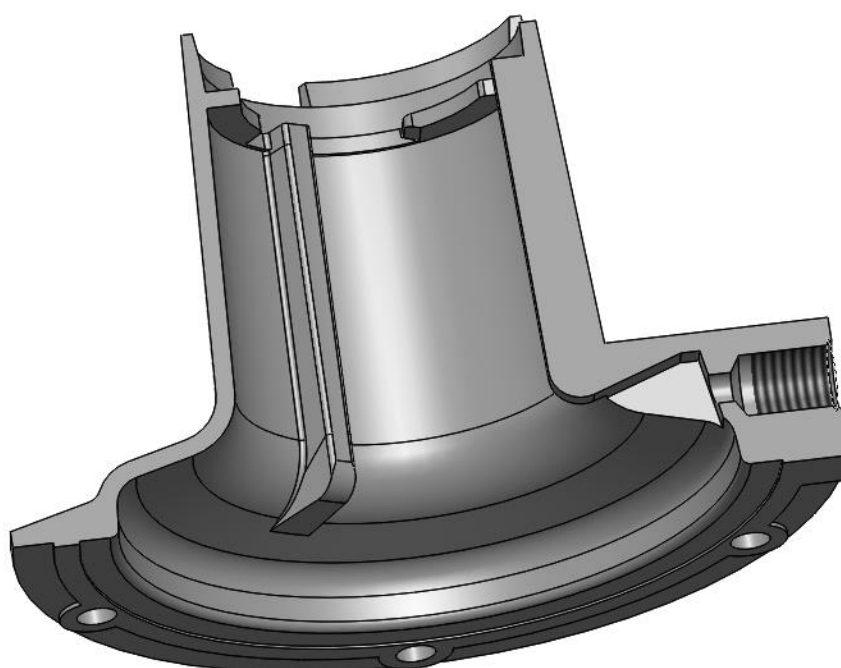
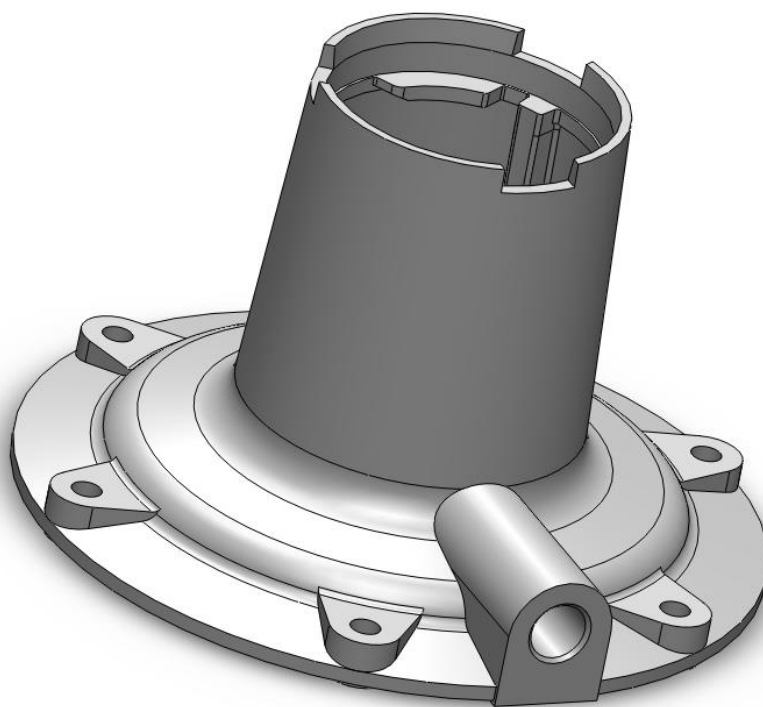
$p$	[Pa, bar]	tlak
$p_1$	[Pa, bar]	tlak pred škrtiacim ventilom
$p_2$	[Pa, bar]	tlak po prechode škrtiaceho ventilu
$\Delta p$	[Pa, bar]	rozdiel tlakov
$w$	[m/s]	rýchlosť
$h$	[J/mol]	entalpia
$p_{out}, p'_{out}$	[Pa, bar]	výstupný tlak
$p_{in}, p'_{in}$	[Pa, bar]	vstupný tlak
$F_p$	[N]	sila od pružiny
$k$	[N/mm]	tuhosť pružiny
$d$	[mm]	stlačenie pružiny
$p_I$	[Pa, bar]	absolútna hodnota tlaku hladiny I
$p_{II}$	[Pa, bar]	absolútna hodnota tlaku hladiny II
$p_{prl}$	[Pa, bar]	pretlak hladiny I voči referenčnému tlaku $p_{ref}$
$p_{ref}$	[Pa, bar]	referenčný tlak
$p_a$	[Pa, bar]	atmosférický tlak
$p_{poll}$	[Pa, bar]	podtlak hladiny II voči referenčnému tlaku
$l$	[m]	výška hladiny vodného stĺpca
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota kvapaliny
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitačné zrýchlenie
$S_v$	[m <sup>2</sup> ]	efektívna plocha ventilu
$S_1$	[m <sup>2</sup> ]	efektívna plocha primárnej membrány
$S_2$	[m <sup>2</sup> ]	efektívna plocha sekundárnej membrány
$\Delta$	[mm]	relatívne posunutie ventilu

## Zoznam obrázkov

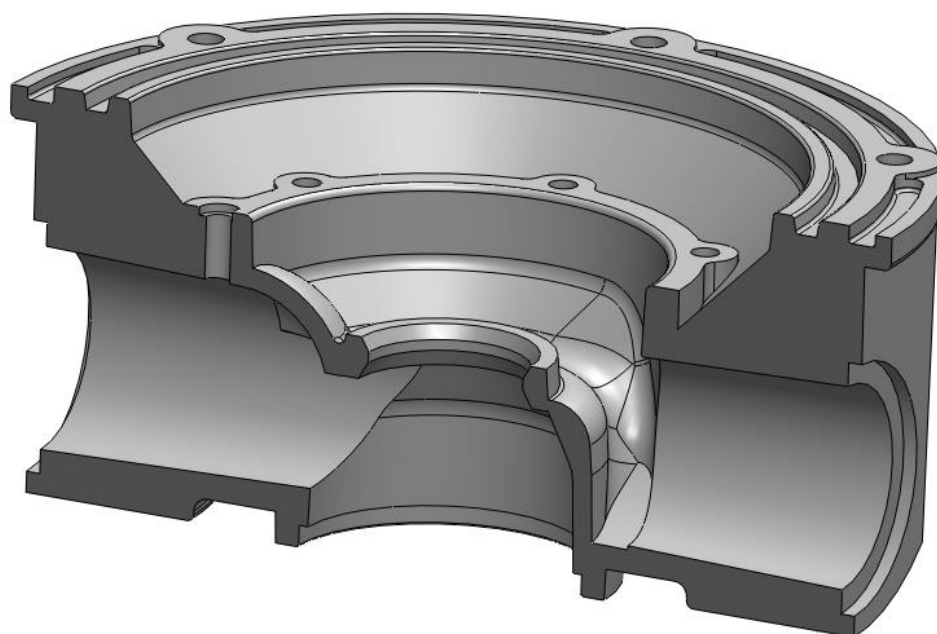
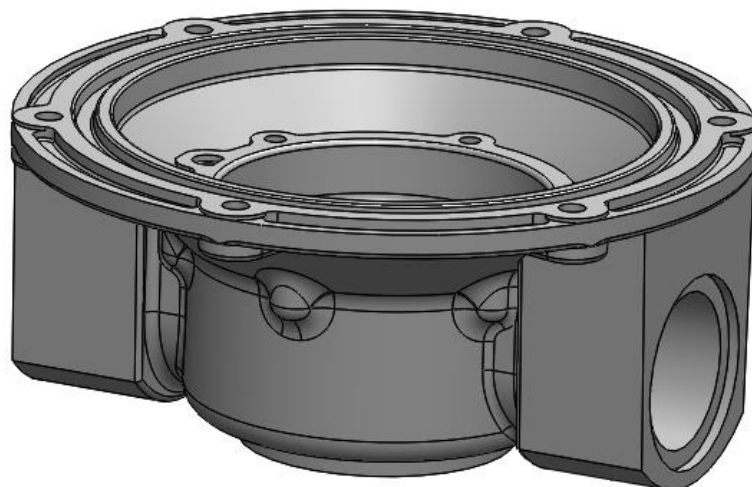
Obrázok 1: Schéma regulačnej siete	12
Obrázok 2: Jednostupňový regulátor, typ 150DJ	13
Obrázok 3: Priebeh škrtiacim ventilom	14
Obrázok 4: Závislosť sily na stlačení pri lineárnej pružine $F_p=k \cdot d$	16
Obrázok 5: Absolútne a relatívne tlaky	17
Obrázok 6: Schéma Bourdonovej trubice	18
Obrázok 7: Schéma vlnovca	18
Obrázok 8: Jednostupňový regulátor, typ 150DJ	19
Obrázok 9: Znázornenie silových účinkov v rovnováhe	21
Obrázok 10: Regulátor z vysokého na nízky tlak, typ J125	22
Obrázok 11: Príklad samočinného odpúšťacieho ventilu	23
Obrázok 12: Príklad samostatného telesa s uzatváracím ventilom	24
Obrázok 13: Samostatné bezpečnostné teleso s uzatváracím ventilom	25
Obrázok 14: Stanica pre skúšku tesnosti a pevnosti	26
Obrázok 15: Detail upevnenia telesa regulátora počas skúšok tesnosti	27
Obrázok 16: Tvar prietokovej charakteristiky	29
Obrázok 17: Schéma meracej trate	30
Obrázok 18: Meracia trať na určovanie prietokovej charakteristiky	30
Obrázok 19: A - detail prípojky skúšaného telesa	31
Obrázok 20: Detail pripojenia regulátora GDJ 25 do meracej trate	31
Obrázok 21: Prietoková charakteristika regulátora GDJ 25	32
Obrázok 22: Hysterézia prietokovej charakteristiky regulátora GDJ 25	33
Obrázok 23: Model regulátora GDJ 25	35
Obrázok 24: Skutočný regulátor GDJ 25	35
Obrázok 25: Rez modelom	36
Obrázok 26: Meranie tuhosti pružiny	37
Obrázok 27: Závislosť medzi objemovým prietokom plynu a otvorením ventilu	38
Obrázok 28: Teleso s prípojkami a škrtiacou clonou	39
Obrázok 29: Detail škrtiacej clony	39
Obrázok 30: Výpočtová oblasť so sieťou	39
Obrázok 31: Detail zjemnenia siete v okolí ventilu	40
Obrázok 32: Okrajové podmienky	40
Obrázok 33: Priebeh tlaku s systéme	41
Obrázok 34: Detail priebehu tlaku v okolí ventilu	42
Obrázok 35: Trajektórie a rýchlosti prúdiacich častíc	42
Obrázok 36: Miesto určenia výstupného tlaku $p'_{out}$ a prietoku	43
Obrázok 37: Pohyblivé časti regulátora na ktorých je určovaná sila	43
Obrázok 38: Závislosť medzi stlačením pružiny a silou vyvolávajúcou stlačenie	44

## Zoznam príloh

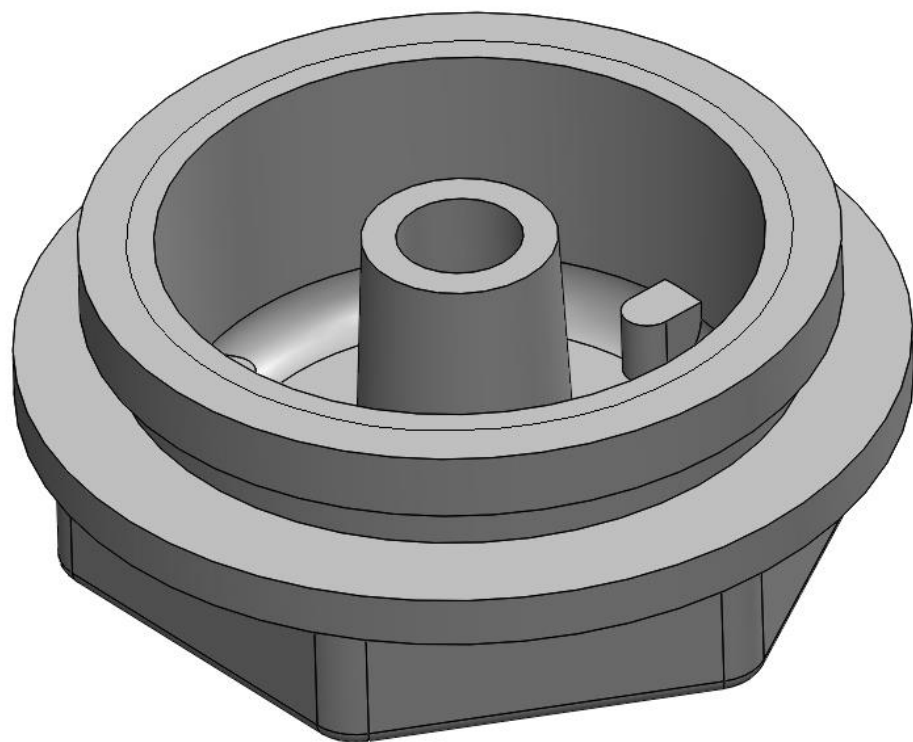
Príloha 1: Vrchný kryt .....	51
Príloha 2: Spodné teleso .....	52
Príloha 3: Spodná zátku .....	53
Príloha 4: Impulzná rúrka .....	53
Príloha 5: Primárna membrána.....	54
Príloha 6: Sekundárna membrána.....	54
Príloha 7: Bezpečnostná membrána .....	55
Príloha 8: Vložka ventilu .....	55
Príloha 9: Držiak taniera ventilu .....	56
Príloha 10: Tanier ventilu.....	56
Príloha 11: Membránová vložka .....	57
Príloha 12: Membránová vložka .....	58
Príloha 13: Odvzdušňovacie sitko .....	58
Príloha 14: Tlačná pružina.....	59
Príloha 15: Nastavovacia skrutka .....	59
Príloha 16: Vrchná krytka .....	59
Príloha 17: Držiak pružiny .....	60
Príloha 18: Uzatváracia páka .....	60
Príloha 19: Puzdro pre nastavovaciu skrutku.....	61
Príloha 20: Podložka k nastavovacej skrutke.....	61
Príloha 21: Podložka tesniaca .....	62
Príloha 22: Vstupná/výstupná prípojka .....	62



Príloha 1: Vrchný kryt



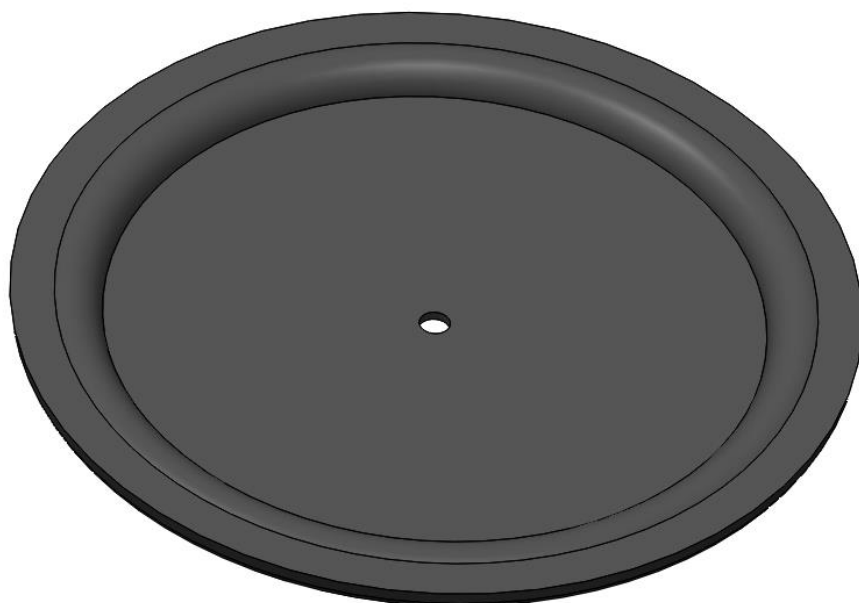
Príloha 2: Spodné teleso



Príloha 3: Spodná zátk



Príloha 4: Impulzná rúrka

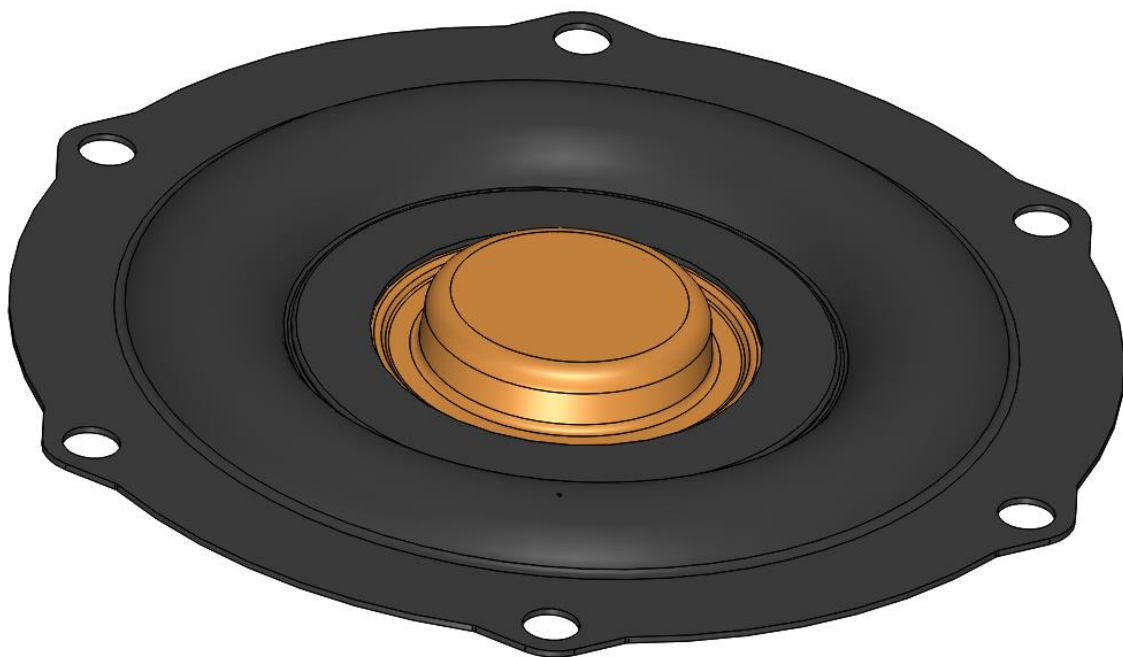


Príloha 5: Primárna membrána

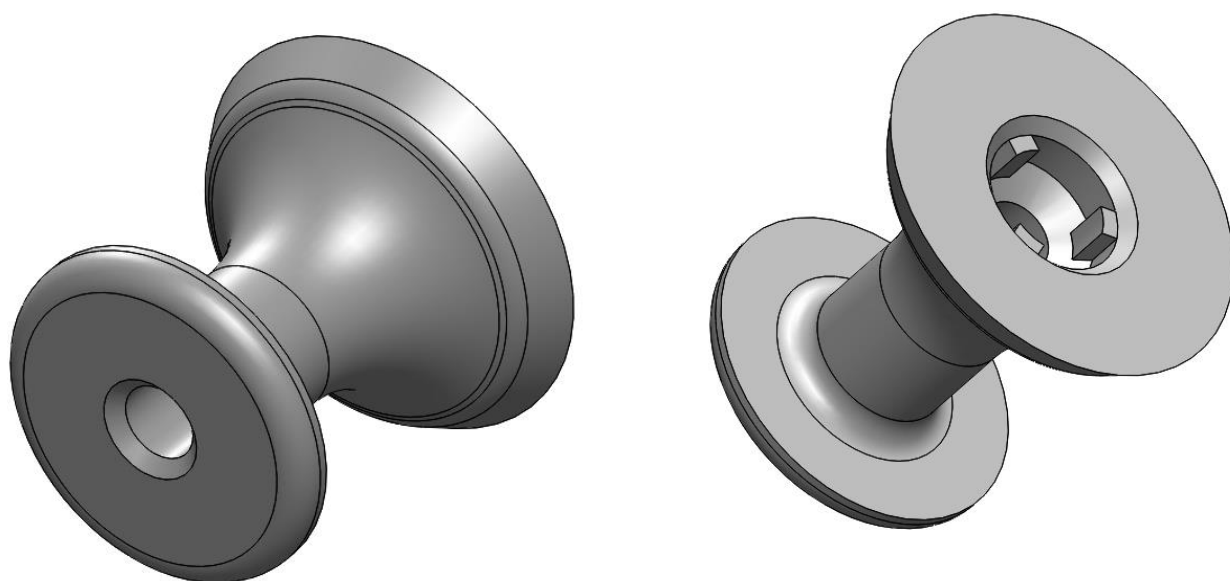


Príloha 6: Sekundárna membrána

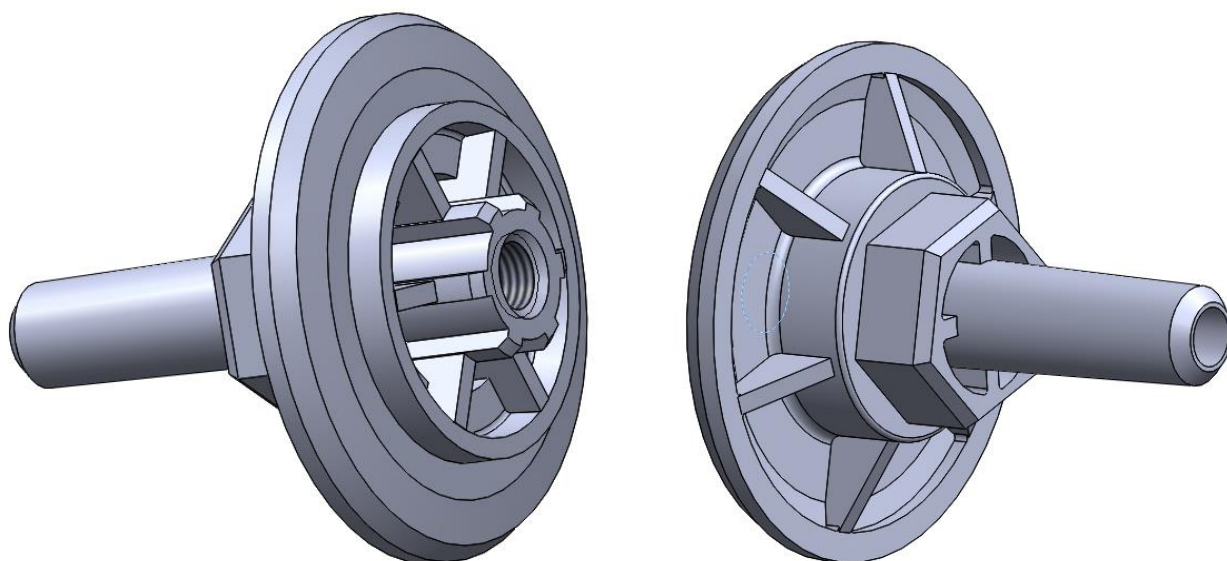




Príloha 7: Bezpečnostná membrána



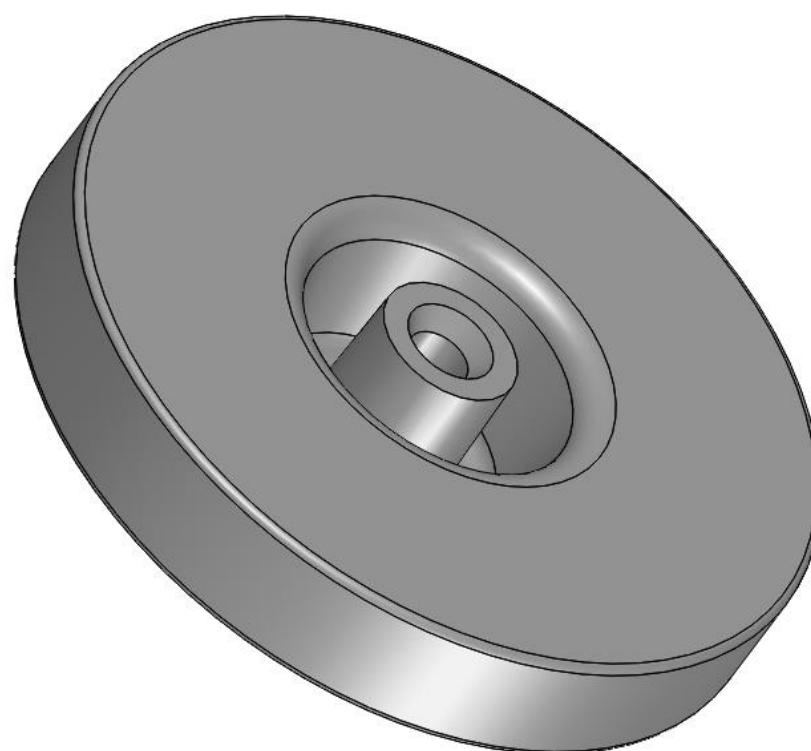
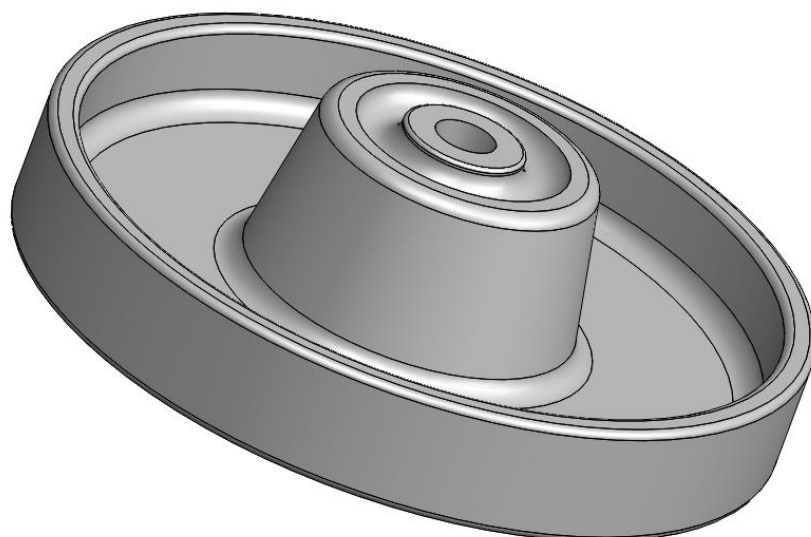
Príloha 8: Vložka ventilu



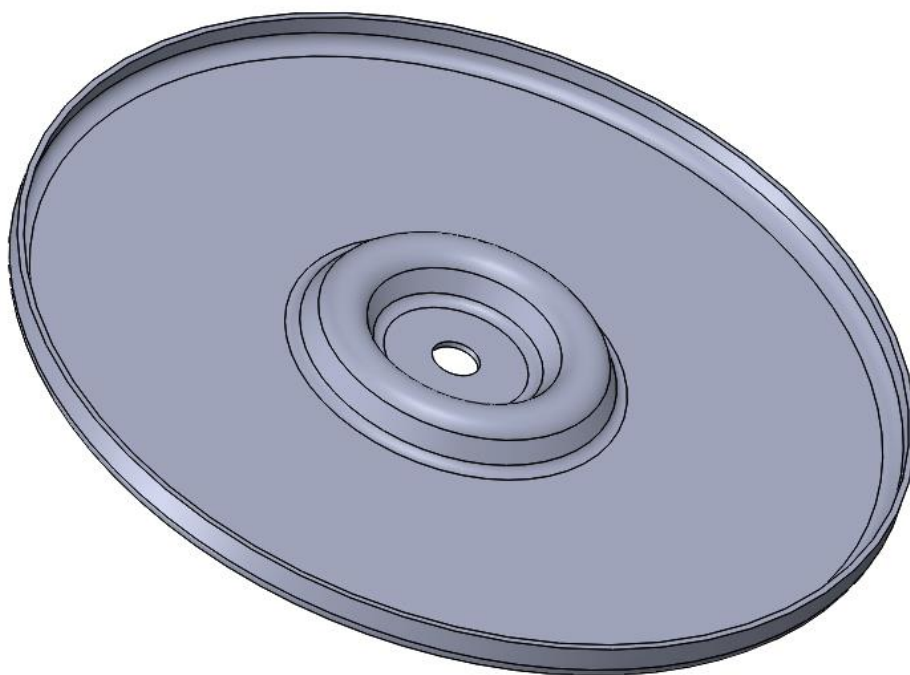
Príloha 9: Držiak taniera ventilu



Príloha 10: Tanier ventilu



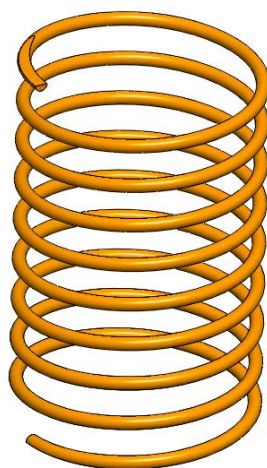
Príloha 11: Membránová vložka



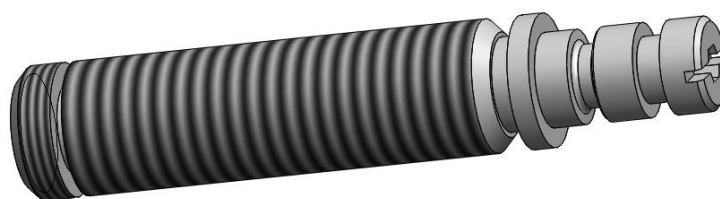
Príloha 12: Membránová vložka



Príloha 13: Odvzdušňovacie sitko



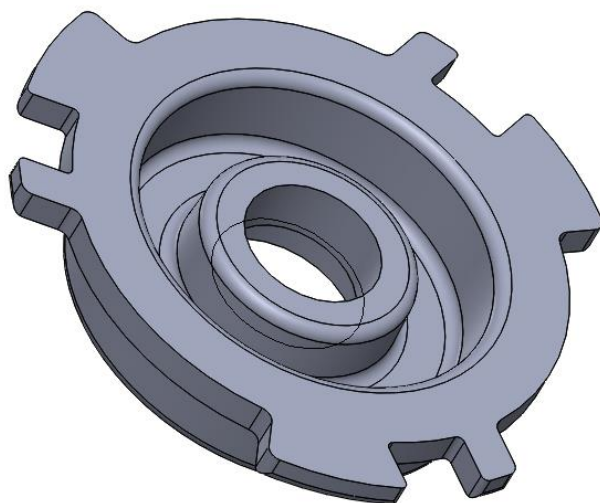
Príloha 14: Tlačná pružina



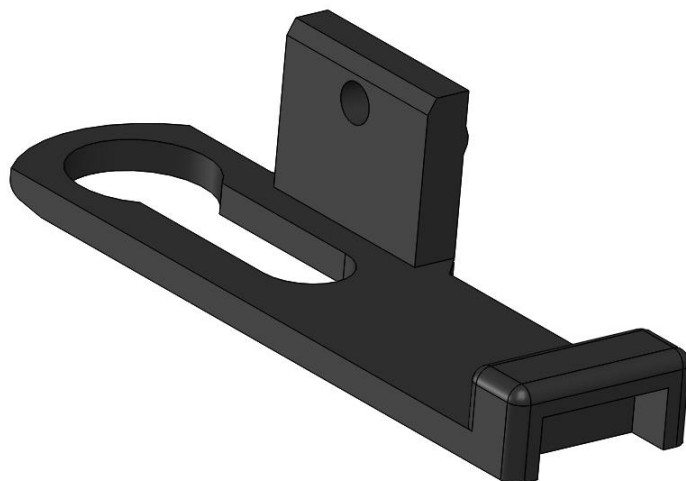
Príloha 15: Nastavovacia skrutka



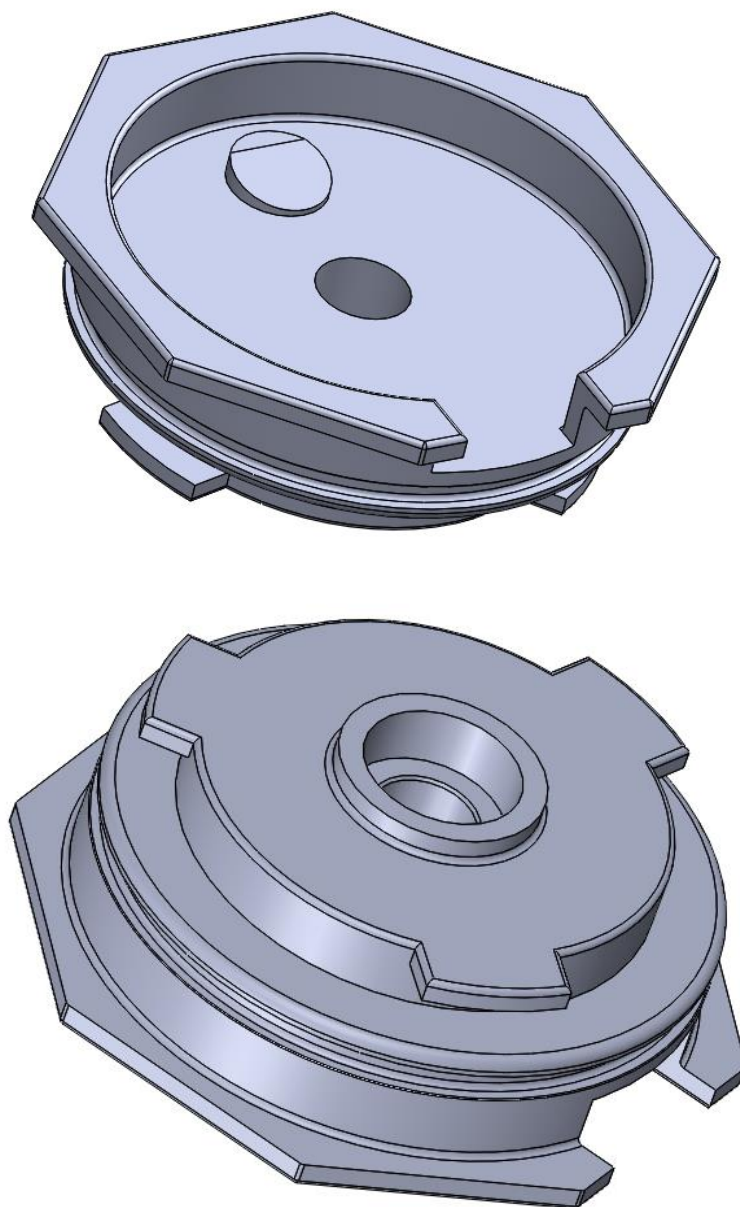
Príloha 16: Vrchná krytka



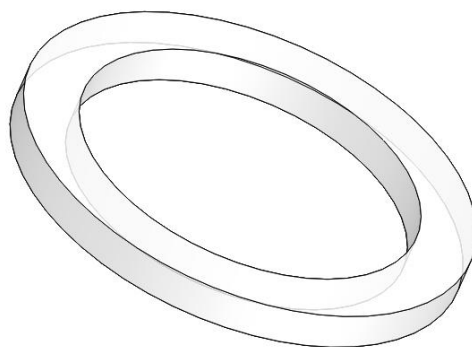
Príloha 17: Držiak pružiny



Príloha 18: Uzatváracia páka

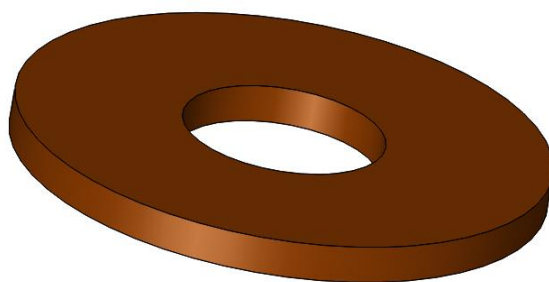


Príloha 19: Puzdro pre nastavovaciu skrutku

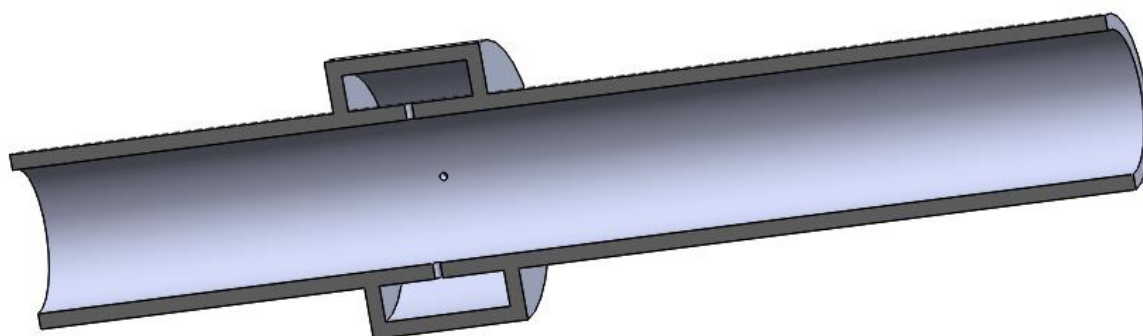
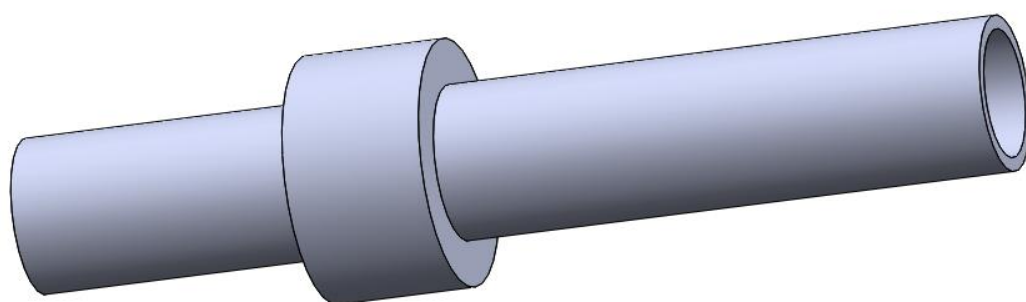


Príloha 20: Podložka k nastavovacej skrutke





Príloha 21: Podložka tesniaca



Príloha 22: Vstupná/výstupná prípojka